Elektromechanische Konstruktionen
Technische Universität Darmstadt BA

Prof. Dr.-Ing. H. F. Schlaak
Prof. Dr.-Ing. R. Werthschützky

B a c h e l o r a r b e i t

für

Herrn Daniel T h i e m

DE: Automatisierung eines Kraftmessplatzes zur Charakterisierung von Nano-Federelementen
EN: Automation of a Force Measuring Station for the Characterization of Nano Spring Elements

Durch das IT-LIG Verfahren (Ion Track Lithographie Galvanoformung) werden am Institut EMK in Kooperation mit dem Fachgebiet Materialanalytik metallische Mikrostrukturen mit einem hohen bis extrem hohen Aspektverhältnis (> 500) hergestellt. Ziel ist es, mit dieser Technik Inertialsensoren (Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren) zu realisieren, die sehr dünne hohe Säulen als Federelemente verwenden und aufgrund der geringen Grundfläche ein großes Miniaturisierungspotential aufweisen.

Für die Charakterisierung der Federelemente wurde ein hochauflösender Kraftmessplatz aufgebaut, der die Aufnahme einer Kraft-Weg-Kennlinie ermöglicht. Die Krafteinleitung in die sehr kleinen Arrays (ca. 50 µm x 50 µm) aus einzelnen Nanodrähten ist jedoch aufgrund der geringen Abmessungen anfällig für Fehler. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher untersucht werden, inwieweit sich das Messergebnis durch eine Automatisierung der Messkopfpositionierung verbessern lässt.

Hierfür müssen zunächst mögliche Fehlerquellen am Messaufbau identifiziert werden. Ihr Einfluss auf das Messergebnis ist anschließend abzuschätzen und wenn möglich im Versuch zu bestimmen. Auf Basis der Fehleranalyse muss ein Konzept für die Positionierung des Messkopfs erstellt und umgesetzt werden. Eine geschickte Integration der Ansteuerung in die am Messplatz vorhandene Steuersoftware ist wünschenswert.

Darmstadt, den 19.08.2013

Beginn der Arbeit:	19.08.2013	Betreuer: Dipl.-Ing. Florian Dassinger
Ende der Arbeit:	XX.XX.XXXX	
Seminar:	XX.XX.XXXX	

Automatisierung eines Kraftmessplatzes zur Charakterisierung von Nano-Federelementen

von Daniel Thiem
Bachelorthesis, vorgelegt im WS 2013/14
Betreuer: Dipl. Ing. Florian Dassinger
Institut für Elektromechanische Konstruktionen

TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Zusammenfassung

Für die mechanische Charakterisierung von Nano-Federelementen wird am Institut für Elektromechanische Konstruktionen gegenwärtig ein Messplatz eingesetzt, welcher mithilfe eines Kraftsensors in Kombination mit einer Aktorik eine Kraft-Weg-Kennlinie für die Federelemente aufzeichnet.

Bisherige Messungen an den Nano-Federelementen zeigen eine Hysterese durch Adhäsion. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit werden deswegen die Ursachen für diese Hysterese betrachtet und Methoden zur Verminderung der Adhäsionskräfte gefunden. Ein besonderes Augenmerk wird dabei zum einen auf die Van-der-Waals Kräfte gelegt, zum anderen werden die Kapillarkräfte betrachtet. Zur Verminderung wird eine Beschichtung der Messspitze oder der Strukturen mit einem weniger adhäsiven Material wie Rhodium oder PVC und eine Senkung der Luftfeuchtigkeit empfohlen.

Bei der Bedienung des Messplatzes gestaltet sich die manuelle Positionierung der Kraftmessspitze vor die Messstruktur, welche eine Breite von $\geq 50\mu$m besitzt, als schwierig und zeitaufwändig. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird deswegen zusätzlich eine automatisierte Lokalisierungs- und Positionierungsmethode für den Messstand entwickelt, um diesen Vorgang zu erleichtern und eine höhere Reproduzierbarkeit zu erreichen. Hierfür wurde der vorhandene Messstand untersucht und die Automatisierung mithilfe einer geometrischen Betrachtung und einer Monte-Carlo-Simulation umgesetzt. Für die Lokalisierung werden Referenzstrukturen, welche auf das jeweils zu vermessende Substrat aufgebracht werden, mit dem Kraftsensor vermessen und somit die relative Position zwischen Messspitze und Substrat bestimmt. Die Referenzstrukturen mit einer charakteristischen Größe c bestehen aus einer schrägen und einer vertikalen Kante (siehe Abbildung). Ziel der Lokalisierung ist dabei, jeweils für die zwei Kanten Geraden zu bilden und darauf den Schnittpunkt zwischen den beiden Kanten zu finden. Dieser Punkt wird als Referenzpunkt für die weiteren Bewegungen genommen. Die Lokalisierung und Positionierung geschieht mithilfe der im Messstand vorhandenen Aktorik. Diese Lösung wird umgesetzt, in das vorhandene LabView-Programm implementiert und charakterisiert. Die Charakterisierung mithilfe eines speziell dafür her-

Abbildung: Form der Referenzstruktur mit schräger Kante mit Pfeilen als Laufwege der Messspitze (links) und das Bilden des Schnittpunktes zwischen den Kanten (rechts).

gestellten Substrates ergibt, dass Wiederholgenauigkeiten in x-Richtung bei $0,4625\mu$m und in y-Richtung bei $1,570\mu$m erreicht werden. Ein Winkelversatz des Substrates kann mit einer Genauigkeit bis $< 0,3^\circ$ erkannt werden. Mithilfe einer zweiten Referenzstruktur kann die Winkelgenauigkeit abhängig von dem Abstand beider Strukturen theoretisch auf $\leq 0,00382^\circ$ verbessert werden.

Erklärung zur Bachelorthesis

Hiermit versichere ich, die vorliegende Bachelorthesis ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Ich bestätige, dass die abgegebene schriftliche und elektronische Fassung übereinstimmen.

Darmstadt, den 20. Januar 2014

____

(Daniel Thiem)

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation

Das Institut für Elektromechanische Konstruktionen der Technischen Universität Darmstadt entwickelt derzeit neuartige Nano-Federelemente. Für die Charakterisierung dieser Strukturen wurde ein Messplatz entwickelt und gebaut. Dabei wird eine Kraftmessspitze an die zu vermessende Struktur herangefahren und daraufhin eine Kraft-Weg-Kennlinie gemessen. In bisher aufgenommenen Kraft-Weg-Kennlinien tritt eine deutlich sichtbare und reproduzierbare Hysterese auf. Eine entsprechende Untersuchung der für diese Hysterese verantwortlichen Kontaktkräfte und eine mögliche Verringerung derselben ist deswegen ein Bestandteil dieser Bachelorarbeit. Für die manuelle Positionierung der Messspitze an die $50 - 300\,\mu$m breiten Strukturen steht eine Kamera mit Vergrößerungsfaktor 275 zur Verfügung. Da der Messaufbau nur eine Kamera besitzt, wird nur ein Blickwinkel ermöglicht. Somit können nicht alle Dimensionen abgebildet werden, was die manuelle Positionierung in der Praxis schwierig gestaltet. Aus diesem Grund soll im Rahmen dieser Arbeit eine Automatisierung des Positionierungsvorgangs stattfinden. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf der möglichst exakten Positionierung der Messspitze zu den zu vermessenden Strukturen.

1.1 Aktueller Messplatz

Das Substrat inklusive zu vermessender Strukturen wird bei dem aktuellen Messplatz (siehe Abbildung 1.2) auf eine Aktorik-Plattform gelegt. Die zu vermessenden Strukturen bestehen dabei aus mehreren Nanodrähten, auf denen galvanisch eine Masse aufgewachsen ist. Die Nanodrähte werden über ein Ionenspurätzverfahren hergestellt [1]. Dabei kann bei der überwachsenen Masse an den Rändern von einer Halbkugelform ausgegangen werden (siehe Abbildung 1.1). Das nur manuell ausgerichtete und nicht befestigte Substrat mit den

Messspitze
Struktur
Überwachsung
Nanodrahtarray
Acc.V Spot Magn Det WD 20 µm
15.0 kV 4.0 1500x SE 15.5

Abbildung 1.1.: Messspitze und exemplarische Struktur (links) und Aufnahme einer umgekippten Struktur im Rasterelektronenmikroskop (rechts) [2]

Strukturen kann mithilfe der Aktorik-Plattform in x- und y-Richtung bewegt werden, um die Strukturen vor die Messspitze zu positionieren. Für die Vermessung der auf dem Substrat aufgebrachten Strukturen existiert ein Kraftsensor von FemtoTools, welcher Kräfte in x-Richtung messen kann. Für die Aufnahme einer Kraft-Weg-Kennlinie ist der Sensor an einer Linearaktorik oberhalb des Substrates angebracht, welche sich lediglich in x-Richtung

Abbildung 1.2.: Skizze des aktuellen Messplatzes aus der Sicht von vorne

bewegen lässt. Der Kraftsensor selbst ist ein modifizierter Mikrogreifer von FemtoTools. Die Messspitze ist dabei aus einkristallinem Silizium gefertigt [3]. Auf dem Messplatz ist zudem ein nicht verbauter konfokaler Abstandssensor vorhanden.

Vor der Vermessung einer Struktur muss zuerst die 50 μm breite Messspitze mithilfe der Aktorik-Plattform vor ihr platziert werden (siehe Abbildung 1.1). Dafür steht dem Nutzer eine Kamera zu Hilfe. Nach der Platzierung kann ein Messprogramm gestartet werden, welches in vorher definierten Schritten die Messspitze positiv in x-Richtung bewegt. So kommt es durch fortschreitende Annäherung zum Kontakt zwischen Messspitze und Struktur. Da die Aktorik in gleichen Schritten weiter fährt, kommt es zu einer Verbiegung der Nanodrähte und es wird Kraft auf die Messspitze aufgebracht. Diese wird gemessen und in Verbindung mit der x-Position gespeichert. Ist eine vorher definierte Kraft überschritten oder eine vorgegebene maximale Strecke abgefahren, so fährt das Programm die Messspitze zurück und nimmt die Hysterese auf. Darauf kann eine weitere Messung gestartet werden. Die Ursache der Hysterese und die Automatisierung des Messplatzes für eine leichtere und reproduzierbare Nutzung ist Aufgabe dieser Arbeit.

1.2 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung der Bachelorarbeit lässt sich in zwei Teile trennen. Zuerst ist eine Betrachtung der auftretenden Fehlerquellen durchzuführen. Im Rahmen der Aufgabenstellung soll ermittelt werden, welche Kontaktkräfte für den zu beobachten Effekt der Hysterese verantwortlich sein könnten. Mit dem Verständnis dieser Effekte und der für die Kontaktkräf-

te verantwortlichen Größen kann betrachtet werden, ob und wie eine Verminderung jener Kräfte möglich ist. Es ist auch der zusätzliche Einfluss einer fehlerhaften Positionierung zu untersuchen (siehe Abbildung 1.3). Wird auf eine Struktur dezentral Kraft eingewirkt, so entsteht ein Drehmoment in dieser.

Abbildung 1.3.: Messspitze trifft die Struktur nicht in der Mitte (Draufsicht)

Als zweiter Teil soll eine Automatisierung der relativen Positionierung der Messspitze zu dem Substrat und den Strukturen erfolgen, um eine höhere Reproduzierbarkeit und einen geringen Positionsfehler zu erreichen. Es ist gewünscht, dass die Automatisierung in LabView implementiert wird. Es dürfen sowohl der Kraftsensor, als auch der konfokale Abstandssensors für die Umsetzung dieser Aufgabe verwendet werden. Auch eine eventuelle Erweiterung der Aktorik oder Sensorik ist möglich, wenn diese für eine Ausgestaltung der besten Lösung der Aufgabe der Automatisierung notwendig ist. Abschließend ist zu überprüfen, inwieweit die automatisierte Positionierung zu einer Verringerung des Fehlers führt, welcher durch ungenaue Anordnung der Messspitze entsteht.

2 Stand der Technik

2.1 Kontaktkräfte zwischen Struktur und Messspitze

Bei der Kraft-Weg-Messung ist reproduzierbar eine Hysterese (siehe Abbildung 2.1) der Messwerte zu sehen. Diese deutet darauf hin, dass auf dem Rückweg die Strukturen über Adhäsionskräfte auch über die Ursprungsposition hinaus an der Messspitze gehalten werden (exemplarisch gezeigt in Abbildung 2.2). Die Ursprungsposition stellt in diesem Fall die Position dar, an der die Messspitze die Struktur zum ersten Mal berührt.

Abbildung 2.1.: Hysterese einer beispielhaften Messung

Abbildung 2.2.: Messspitze und Struktur in der Messung (links) und in der Hysterese (rechts)

Auch dem Hersteller der Kraftsensorik ist dieses Problem bekannt. Derzeit gibt es noch keine Möglichkeit, diesen Effekt komplett zu eliminieren, allerdings können durch eine kleine Wolframkugel mit 3 μm Durchmesser an der Messspitze die Adhäsionskräfte vermindert werden. Allerdings ist für den benutzten Greifer ein solcher Kugelaufsatz nicht verfügbar. Als Ursachen für diese Adhäsionskräfte kommen mehrere Effekte infrage. Eine Literaturrecherche

zeigt, dass Van-der-Waals-Kräfte, Ladungsaustauschwechselwirkungen und Kapillarkräfte besonders wahrscheinlich sind.

2.1.1 Van-der-Waals-Kräfte

Van-der-Waals Kräfte treten zwischen Atomen beziehungsweise Molekülen auf. Diese sind bei kleinen Abständen besonders relevant. Dabei spielt die Polarität der Atome oder Moleküle keine Rolle für das Auftreten dieser Kräfte. Aufgrund des Einflusses der Lichtdispersion im sichtbaren und UV-Licht werden diese Kräfte auch Dispersionskräfte genannt. Die Quantenmechanik bietet eine Erklärung der Wirkungsweise dieser Kräfte. Nichtpolare Atome besitzen durch das ständige Schwingen der Elektronen in kurzen Zeitabschnitten ein finites Dipolmoment, welches ein elektrisches Feld aufbaut und ein nahegelegenes Atom polarisiert [4, s. 83f].

Bei den Van-der-Waals-Kräften kommt es in Abhängigkeit von verschiedenen verwendeten Materialien zu variablen Größen der Kräfte. In dem Messaufbau haben sowohl das Material der Messspitze, als auch das Material der Messstruktur Einfluss auf diese Kräfte. Eine Möglichkeit, die Interaktion verschiedener Materialien zu beziffern, ist die Hamaker-Konstante. Sie kann mit der Lifshitz-Theorie angenähert werden, welche Atomstrukturen vernachlässigt und die Kräfte zwischen zwei großen Körpern darstellt [4, s. 180]. Die Annäherung erfolgt über die folgende Formel[5]:

$$A_H \approx \frac{3}{4}k_B\left(\frac{\varepsilon_1-\varepsilon_2}{\varepsilon_1+\varepsilon_2}\right)\left(\frac{\varepsilon_3-\varepsilon_2}{\varepsilon_3+\varepsilon_2}\right)+\frac{3h\nu_e}{8\sqrt{2}}*\frac{(n_1^2-n_2^2)(n_3^2-n_2^2)}{\sqrt{(n_1^2+n_2^2)}\sqrt{(n_3^2+n_2^2)}\left(\sqrt{(n_1^2+n_2^2)}+\sqrt{(n_1^2+n_2^2)}\right)} \tag{2.1}$$

Dabei stellt ν_e die Frequenz des tiefsten Elektronenübergangs dar. Dies ist die elektronische Absorptionsfrequenz im ultravioletten Bereich. Sie liegt typischerweise bei $3 \cdot 10^{15}\,\mathrm{s}^{-1}$ [4, s. 184]. Die Werte n_1,n_2 und n_3 stellen die Brechungsindizes im sichtbaren Frequenzbereich der Materialien dar, während ε_1, ε_2 und ε_3 die Dielektrizitätszahlen jener Materialien sind. Eine der Materialien 1, 2 oder 3 ist die Luft oder ein anderes Material, welches zwischen den Kontakten auftreten kann [4, s. 185]. Somit ist diese Formel auch beispielsweise für Berechnungen in Wasser geeignet. Außerdem ist $\mathrm{k_B}$ die Boltzmann-Konstante und h das Plancksche Wirkungsquantum.

Für eine exemplarische Betrachtung der Auftretenden Kräfte zwischen Messspitze und Strukturen, bietet es sich an, Strukturen aus Gold heranzuziehen. Gold hat die Dielektrizitätszahl $\varepsilon_{\mathrm{Gold}} = 6,9$ [6] und den Brechungsindex $\mathrm{n_{Gold}}(\lambda = 550\,\mathrm{nm}) = 0,35929$ [7]. Die Siliziummessspitze besitzt die Dielektrizitätszahl $\varepsilon_{\mathrm{Si}} = 11,9$ [8] und den Brechungsindex $\mathrm{n_{Si}}(\lambda = 550\,\mathrm{nm}) = 4,08443$ [7]. Daraus ergibt sich eine Hamakerkonstante für diese Kombination von:

$$\mathrm{A_H} \approx 3,05856 * 10^{-19}\,\mathrm{J}$$

Aufgrund der halbkugelförmigen Überwachsung der Strukturen kann als geometrische Anordnung von einer Sphären-Oberflächen-Kombination (siehe Abbildung 2.3) ausgegangen werden. Somit gelten folgende Beziehungen für die Energie und die Kraft zwischen Messspitze und Struktur [5]:

$$E = \frac{-A_H R}{6D} \tag{2.2}$$

Sphere or macromolecule of radius R near a flat surface

$R \gg D$

Abbildung 2.3.: Geometrische Anordnung der Messspitze zu der Struktur mit R als Radius der Struktur und D als „cut-off-Distance“ zwischen Struktur und Messspitze [5]

$$F = \frac{-A_H R}{6D^2} \tag{2.3}$$

Dabei ist D die „cut-off-Distance“, also die Distanz, bei welcher es zu einer Trennung der Materialien kommt. Diese wird in der Literatur gewöhnlich als $D_0 \approx 0,165\text{nm}$ [5] angenommen. Der Radius wird mit $200\,\mu\text{m}$ abgeschätzt. Daraus ergibt sich eine berechnete Kraft von:

$$F_{vdw} = 37,74479\,\mu\text{N}$$

Dieser Wert liegt im Bereich der Messungen, welche bisher durchgeführt wurden und können somit als mögliche Erklärung für die Hysterese herangezogen werden. Zudem ist anzumerken, dass der Kopf der Struktur lediglich eine Halbkugel ist. Die veränderte Geometrie kann möglicherweise die Ausprägung der Kraft beeinflussen.

Weitere Recherchen ergeben, dass die Adhäsion bei Gold besonders stark auftritt. Bei Werkstoffen, welche beispielsweise mit Oxiden verunreinigt wurden, fällt die Adhäsion signifikant schwächer aus [9]. So ist die Hamakerkonstante von Aluminiumoxid zu Aluminiumoxid $5,4 \cdot 10^{-20}\,\text{J}$, während die Hamakerkonstante von Gold zu Gold mit $40 \cdot 10^{-20}\,\text{J}$ angegeben wird [10]. Dies deutet darauf hin, dass Strukturen, welche mit Oxiden verunreinigt werden, geringere Van-Der-Waals-Kräfte zufolge haben könnten.

Auch die Oberflächenrauheit hat Auswirkungen auf die Stärke der Van-der-Waals Kräfte. Der Zusammenhang kann dabei wie folgt ausgedrückt werden [11]:

$$F_{vdwb} = \left(\frac{D}{D + b/2}\right)^2 \cdot F_{vdw} \tag{2.4}$$

Dabei entspricht F_{vdw} der berechneten Van-der-Waals-Kraft und b gibt die Oberflächenrauigkeit an. Ist diese erhöht, hat das somit eine Verminderung der Van-der-Waals-Kräfte zur Folge. Jedoch besitzt die Messspitze durch den Einsatz von Silizium eine sehr glatte Oberfläche. Die Oberfläche der Strukturen besitzt allerdings durch das galvanische Aufwachsen eine höhere Oberflächenrauheit.

Neben Van-Der-Waals-Kräften kann es auch zu Adhäsion über andere Effekte kommen. Möglich ist auch der Effekt der Kapillarkräfte.

2.1.2 Kapillarkräfte

Zwischen zwei Oberflächen kann es zu einer Kondensation von Luftfeuchtigkeit kommen. Hierdurch formt sich ein flüssiger Meniskus und ein Druck zwischen den Oberflächen entsteht. Dies geschieht durch die in der Flüssigkeit vorliegende Oberflächenspannung. Außerdem führt der Unterschied zwischen Umgebungsdruck und dem kapillaren Druck zu einer Kraft zwischen den Oberflächen. Dieser Druckunterschied lässt sich durch die Laplace-Gleichung berechnen:

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \tag{2.5}$$

Dabei beschreibt γ die Oberflächenspannung. r_1 und r_2 kennzeichnen demgegenüber die Hauptkrümmungen im Krümmungskreis des Mensikus. Für die Interaktion zwischen einer Kugel und einer planaren Oberfläche errechnet sich die kapillare Kraft wie folgt:

$$F = 2\pi\gamma l - \pi l^2 \Delta P \tag{2.6}$$

l ist der azimuthale Radius und r stellt den perpendikularen Radius dar. Dies ist in Abbildung 2.4 dargestellt zu sehen [12]. In [13] wird gezeigt, dass das Volumen nach etwa 2

Abbildung 2.4.: Darstellung der Radien bei Menisken zwischen einer Kugel und einer planaren Fläche [12]

Millisekunden Kontakt schon ein Gleichgewicht erreicht und sich somit das Volumen des Meniskus nicht mehr verändert. Deswegen ist es möglich von einem konstanten Volumen des

Meniskus auszugehen. In [14] wird für diesen Fall die Kraft bezogen auf den Radius R_1 der Kugel wie folgt berechnet:

$$\frac{F}{R_1} = \pi\gamma x' \left(1 - \frac{x'\left[\cos(\Theta_1 + \alpha) + \cos\Theta_2\right]}{H' + 1 - \sqrt{1 - x'^2}} - 2\sin\left(\Theta\alpha_1 + \alpha\right)\right) \tag{2.7}$$

$$\alpha = \arctan\left[\frac{x'}{1 - x'^2}\right] \tag{2.8}$$

$$x' = \sqrt{-2H' + 2\sqrt{H'^2 + \frac{V}{\pi R_1^3}}} \tag{2.9}$$

$$H' = \frac{D}{R_1} \tag{2.10}$$

Für $\Theta_1 = 0$ und $\Theta_2 = 0$, bei einem Abstand D im Bereich von Nanometern, der Oberflächenspannung von Wasser $\gamma = 72,75\,\mathrm{mN\,m^{-1}}$, einem Kugelradius entsprechend einem Strukturkugelradius von $R_1 = 200\,\mu\mathrm{m}$ und einem Volumen im Bereich $V = 500\,\mu\mathrm{m}^3 ... 100000\,\mu\mathrm{m}^3$ ergibt sich eine Kraft im Bereich $F \approx 100$ bis $150\,\mu\mathrm{N}$. Werden die Volumen kleiner, so geht der Betrag der Kraft gegen $0\,\mu\mathrm{N}$. Arai et al. [11] nutzen für die Berechnung der Kraft die Näherung $F \approx \pi\gamma R_1$. Mit dieser Approximation wäre mit $F \approx 45,71\,\mu\mathrm{N}$ zu rechnen. Beide Werte liegen über den Kräften bei der gemessenen Hysterese. Jedoch ist zu bedenken, dass die Überwachsung der Nanostrukturen lediglich eine Halbkugel bildet. Die angegebenen Abschätzungen und Formeln gehen allerdings von einer vollen Kugel aus. Diese geänderte Geometrie hat einen Einfluss auf die Form des Meniskus. Auch ist anzumerken, dass es durch die Herstellung über eine galvanische Abscheidung zu einer hohen Oberflächenrauheit kommen kann. Dies beeinflusst die Geometrie des Meniskus und somit auch die wirkende Kapillarkraft zwischen Struktur und Messspitze.

2.1.3 Sonstige auftretende Kontaktkräfte

Nicht nur Van-der-Waals- und Kapillarkräfte sind Ursachen von Adhäsion. Auch andere Effekte können eie Rolle spielen [15, s. 8]. Einen Einfluss haben außerdem mechanische Haftkräfte, wie beispielsweise ein Verstricken der Oberflächen, und elektrostatische Kräfte, welche vor allem bei schlecht leitenden Materialien beobachtet werden können und sind deswegen im Rahmen dieses Szenarios zu vernachlässigen.

Zwischen Ionen selbst, zwischen Ionen und Dipolen und zwischen Ionen und nichtpolaren Molekülen, auf welche die Ladung ein Dipolmoment induziert, können Wechselwirkungen auftreten. Bei Kontakten zwischen Metall und einem Material mit geringer Leitfähigkeit kann zudem ein spontaner Ladungsaustausch stattfinden. Dies heißt „Kontaktelektrifizierung“. Man geht davon aus, dass dies aufgrund von Qunatentunneln oder dem Transfer von Oberflächenionen stattfindet. Diese übertragene Ladung erzeugt dabei eine hohe Adhäsion mit Energien über $1000\,\mathrm{mJ/m^2}$. Besonders bei Rollreibung trockener Materialien treten diese Energien auf [5]. Die hier aufgeführten Ladungsaustauschwechselwirkungen können auch einen Einfluss auf die Adhäsionskräfte zwischen Struktur und Messspitze haben. Da dieser Effekt noch nicht vollständig erklärt ist, ist eine Abschätzung auf den Kontakt zwischen Struktur und Messspitze nicht möglich.

2.1.4 Zusammenfassung

Die für die Hysterese verantwortlichen auftretenden Adhäsionskräfte lassen sich nicht auf einen Effekt alleine zurückführen. Es zeigen sich hier zwei dominante Effekte: Die Van-der-Waals-Kräfte und die Kapillarkräfte. Die Van-der-Waals-Kräfte sind von den jeweiligen gegenüberliegenden Materialien abhängig, während die Kapillarkräfte im Wesentlichen durch den sich bildenden Meniskus zwischen Messspitze und Struktur entstehen. In beiden Fällen spielen der Radius der Struktur und der Abstand zwischen beiden Objekten eine Rolle. Neben diesen Effekten sind noch elektrostatische Kräfte, mechanische Haftkräfte und Ladungsaustauschwechselwirkungen möglich.

In der Literatur werden einige Methoden zur Verminderung dieser Adhäsionskräfte genannt [15, s. 9]:

- Minimierung der Luftfeuchtigkeit, um eine Verringerung der Kapillarkräfte zu erreichen
- Erhöhung der Messspitzenhärte. Dies vermindert das mechanische Ineinandergreifen der Oberflächenstrukturen
- Optimierung der Oberflächenrauheit der Kontaktflächen. Eine Erhöhung der Oberflächenrauheit zur Verminderung der Van-der-Waals-Kräfte wurde auch experimentell bestätigt [11].

Um zwischen elektrischen Kontakten die Adhäsionskräfte zu vermindern, untersuchte S.P. Sharma verschiedene Beschichtungen und kommt durch Messungen zu dem Schluss, dass eine Rhodium-Beschichtung zu einer Verminderung der Anziehungskräfte führt [9]. Auch eine Beschichtung mit PVC oder Kohlenstoff kann zu einer Verminderung der Van-der-Waals-Kräfte führen [11].

2.2 Bestehende automatisierte Positionierungsmethoden

Weiterer Bestandteil der Aufgabe ist die Lokalisierung und Positionierung der Messspitze gegenüber des Substrats. Für die Automatisierung ist es notwendig, eine Information über die relative Position des Kraftsensors zum Substrat zu gewinnen. Hierfür werden oftmals optische Verfahren eingesetzt.

Optische Lokalisierung

Im Bereich der Mikromontage ist das Problem der Lokalisierung eines Werkstückes regelmäßig zu behandeln. Kommerzielle Mikromontageanlagen, wie der FINEPLACER ®FEMTO, erreichen dabei eine Genauigkeit in der Lokalisation besser als 3 μm durch den Einsatz von Kamera und Optik. Die Kamera erfasst ein Werkstück, welches mit Justagemarken bestückt ist. Das Bild der Kamera wird mit einer Bildverarbeitungssoftware ausgewertet und die Justagepunkte erfasst. Durch die bekannte Position der Kamera kann auf die Position des Werkstückes in der x-y-Ebene rückgeschlossen werden [16].

Um neben der Position in der x-y-Ebene auch noch in z-Richtung zu Lokalisieren, setzt Rembe et al. ein stroboskopisches Interferometer neben der CCD-Kamera ein. Dabei werden Auflösungen im Bereich von 5 nm erreicht. [17]. Ein System von Burdess et al. für die dynamische Charakterisierung von Nanostrukturen nutzt ein Kamerasystem in Kombination mit einem Vibrometer für die Lokalisierung der Strukturen. Dabei erfolgt die Bewegung einer Stage in

x-,y- und z-Richtung mit einer Aktorik des Herstellers Physik Instrumente. Hiermit wird eine Positionsgenauigkeit von besser als 10 μm erreicht [18].

Bei der Entwicklung einer automatisierten Glasfaser-Montage mit einer Genauigkeit von kleiner als 5 μm wird auch auf ein Kamerasystem mit UV-Licht gesetzt (siehe Abbildung 2.5) [19]. Dabei wird eine Kamera mit der Auflösung von $1024 * 768$ Pixel mit einem Objektiv

Abbildung 2.5.: Skizze der Montageanlage aus [20]

mit 8-facher Vergrößerung eingesetzt. Dadurch nimmt die Kamera ein Feld von $800{*}600\,\mu\text{m}^2$ auf. Dies Resultiert in einer Auflösung von $0,78\,\mu$m/Pixel. Die Auswertung des Kamerabildes geschieht durch LabView/IMAQ [20].

Einige Systeme haben für eine Lokalisierung in drei Dimensionen ein oder teilweise zwei weitere Kamera-Systeme[21][22]. Auch der am Institut EMK vorhandene MEMS-Analyzer nutzt eine optische Bildverarbeitung, um einen Prüfling auf einem x-y-Tisch korrekt zu positionieren [23].

Positionierung an eine feste Position

Yamagata et al. [24] nutzt piezoelektrische Elemente, um das zu bearbeitende Objekt auf bis zu 0,1 μm genau zu positionieren. Dabei sind von allen Seiten Piezoaktoren angebracht welches das Objekt in eine vohrher definierte Position anbringen (siehe Abbildung 2.6). Ferreira et al. [25] nutzen für die Lokalisierung ein optisches Tracking unter einem Mikroskop in einer Kombination mit einer Piezo-Mikroaktorik zur exakten Ausrichtung des Objektes.

Lokalisierung über Kontakt

Ein Nanomontageroboter von Chen, Xi und Li [26] nutzt ein Rasterkraftmikroskop in Verbindung mit einem CAD-Modell zur genauen Lokalisierung der Objekte. Bei der Berechnung des Laufweges der Spitze wird zur Verminderung möglicher Van-der-Waals-Kräfte ein minimaler Abstand zu anderen Strukturen beachtet.

Abbildung 2.6.: Positionierungssystem für die aktive Positionierung aus [24]

Zusammenfassung

Dem Stand der Technik entsprechend werden optische Systeme in der Regel eingesetzt, jedoch wird oft von Mess- oder Montagespitzen ausgegangen, deren Positionen im Raum bekannt sind. Die Messspitze des zu automatisierenden Messstandes wird jedoch aufgrund eines modularen Aufbaus regelmäßig ein- und ausgebaut, was oft eine Verschiebung im Raum zur Folge hat. So ist auch eine Lokalisierung jener Messspitze für eine akkurate Positionierung des Substrates gegenüber der Messspitze notwendig. Diese Lokalisierung existiert bei den gefundenen Systemen nicht, was das Finden einer speziellen Lösung für den Messstand notwendig macht.

3 Automatisierung der Positionierung

Es ist zu sehen, dass die Lösungen aus dem Stand der Technik wegen der notwendigen Ortung der Kraftmessspitze nicht ohne weiteres auf den vorhandenen Kraftmessplatz zu übertragen sind. Deswegen ist es notwendig, eine Eigenentwicklung durchzuführen, um eine einfache, möglichst reproduzierbare und wenig zeitintensive Positionierung zu erlangen. Um den Versatz der Messspitze gegenüber den Strukturen möglichst klein zu halten, ist eine ausreichend hohe Positions- und Wiederholgenauigkeit notwendig. Hierfür müssen zuerst die Anforderungen bestimmt werden.

3.1 Anforderungen an die Positionierung

Für die Positionierung muss die relative Position zwischen Substrat und Kraftsensor innerhalb der x-y-Ebene bekannt sein. Die Positionierung der Messspitze in z-Richtung wird bisher manuell durchgeführt. Es ist gewünscht, diese Richtung auch zu automatisieren. Die Lokalisierung und Positionierungsautomatisierung muss verschiedenen Anforderungen genügen, damit die Messungen reproduzierbar und mit geringem Messfehler behaftet sind. Entscheidend hierfür sind die Positions- und Wiederholgenauigkeiten entlang der x- und y-Achsen. Um den Einfluss des Versatzes auf das Messergebnis zu bestimmen, bietet ein Vorversuch die nötigen Informationen. Hierbei wird die Messspitze mit verschiedenen Versätzen in y-Richtung manuell vor die Struktur positioniert und dort eine Kraft-Weg-Kennlinie aufgezeichnet (siehe Abbildung 3.1). Da die Messspitze eine $50\,\mu$m breite Fläche für den Kontakt

Abbildung 3.1.: Positionieren der Messspitze an die Struktur mit Versatz

besitzt und die Strukturen eine kreisförmige Überwachsung haben, wird bis zu einem Versatz der Messspitzenmitte um $25\,\mu$m der vorderste Punkt der Struktur getroffen. Dies ist in beide Richtungen von dem Mittelpunkt der Struktur möglich. Deswegen wird eine Forderung für die Toleranz in der Positions- und Wiederholgenauigkeit auf $50\,\mu$m abgeleitet. Trotzdem ist

gewünscht, die Positionierung so genau wie möglich zu gestalten, um auch korrekte Messungen an viereckigen Strukturen, welche sich bei einer dezentralen Anregung verdrehen, oder bei Messspitzen mit einer kleinen aufgebrachten Wolfram-Kugel durchzuführen (siehe Abbildung 3.2). Ein weiterer Wunsch ist, die schon verbaute Aktorik zu nutzen. Falls diese nicht ausreichend Positions- oder Wiederholauflösung bietet, ist es möglich, eine zweite, schon vorhandene, Linear-Stage zu nutzen. Diese ist Baugleich mit der Linear-Stage, welche den Kraftsensor bewegt. Weitere Anforderungen sind in der Kompletten Anforderungsliste im Anhang unter A.1 zu sehen.

Abbildung 3.2.: Auftreffen der Messspitze mit Wolframspitze auf runde Struktur (links) und Auftreffen der Messspitze auf breite viereckige Struktur (rechts)

Tabelle 3.1.: Wesentliche Anforderungen an die Automatisierung

F/W	Anforderung	Wert	Quelle
F	Positionierungsgenauigkeit x- und y- Achse	$50\,\mu m$	Vorversuche
W	Positionierungsgenauigkeit x- und y- Achse	$< 50\,\mu m$	Vorversuche
F	Wiederholgenauigkeit x- und y- Achse	$50\,\mu m$	Vorversuche
W	Wiederholgenauigkeit x- und y- Achse	$< 50\,\mu m$	Vorversuche
W	Implementierung in vorhandener Steuersoftware	Labview	Aufgabenstellung
W	Nutzen einer z-Aktorik	Nanoaktorik	Besprechung

3.2 Blackbox der Automatisierung

Für eine Übersicht über die automatisierte Positionierung bietet sich eine Abstrahierung mit Hilfe einer Blackbox (siehe Abbildung 3.3) an.

Die Kraftmessspitze und das Substrat mit den Messstrukturen gehen jeweils als Stoff in die Blackbox ein. Zudem ist das Einbringen von elektrischer Energie für die Aktorik notwendig. Außerdem muss bekannt sein, wohin die Messspitze relativ zum Substrat positioniert werden muss. Dies wird über die Nachricht der Zielposition eingegeben. Nach dem Durchlaufen

Adhäsion

Vibrationen

Fertigungsungenauigkeit des Substrats

$St_{Kraftsensor}$

$St_{Substrat}$

E_{el}

$N_{Zielposition}$

Automatisierte Positionierung des Kraftsensors relativ zu Messstrukturen

$St_{Substrat}$

$St_{Kraftsensor}$ Positioniert

Geforderte Positionierungsgenauigkeit: 50μm

Genauigkeit X-Y-Tisch: 5 μm

Genauigkeit Nano-Linearaktor: 1 nm

Abbildung 3.3.: Blackbox der automatisierten Positionierung des Kraftmessplatzes

der Blackbox ist der Kraftsensor gegenüber dem Substrat so positioniert, dass die Messung beginnen kann. Die Genauigkeit der vorhandenen Aktorik stellt sich, genauso wie die geforderte Positionsgenauigkeit, als Restriktion dar. Die Positionierung kann von der Adhäsion, welche bei Kontakt auftritt, beeinflusst werden. Zudem können Vibrationen und Fertigungsungenauigkeiten an der Messspitze und auf dem Substrat für Störeinflüsse verantwortlich sein.

3.3 Teilprobleme

Das Verzweigen logischer und physikalischer Wirkungsweisen innerhalb der Positionsautomatisierung ermöglicht das methodische Hilfsmittel der Funktionsstruktur mit der Roth-Notation. Durch das Variieren der Funktionsblöcke kann der Lösungsraum mit neuen Ideen erweitert werden. Eine Variation ist in Abbildung 3.4 gezeigt.

Mit der eingehenden Elektrischen Energie wird der Kraftsensor in Bewegung gebracht, um Kontakt zwischen dem Substrat und dem Kraftsensor herzustellen. Über diesen Kontakt wird die relative Position zwischen diesen Beiden bestimmt. Der Vergleich der Zielposition mit der relativen Position führt zu einer Information über den Weg, welcher überwunden werden muss, um die Messspitze vor der zu vermessenden Struktur zu platzieren. Dieser Weg wird über eine Aktorik umgesetzt.

Abbildung 3.4.: Funktionsstruktur mit den Teilproblemen

Feststellen der Position zwischen Kraftsensor und Substrat (A-Problem)

Hierbei wird die Nachricht über die Position durch den Kontakt zwischen Kraftsensor und Struktur gewonnen. Dieses Teilproblem ist in Abbildung 3.4 mit A markiert; es ist mit dem größten Innovationshub verbunden und ist somit als A-Problem kategorisiert. Dabei sind als Eingänge jeweils der Kraftsensor und das Substrat gegeben. Während diese Stoffe das Teilproblem durchlaufen, wird die relative Position zwischen Substrat und Kraftmessspitze gewonnen. Neben der hier aufgezeigten Wirkungsweise zur Gewinnung der Lokalisation ist allerdings noch die separate Positionsgewinnung jeweils des Kraftsensors und des Substrates möglich. Sind die Positionen der beiden Elemente bekannt, ist die relative Position zwischen jenen errechenbar (siehe Abbildung 3.5).

Abbildung 3.5.: Feststellen der Position ohne Kontakt zwischen Kraftsensor und Substrat

Berechnung eines sicheren Weges (B-Problem)

Nachdem die Position des Sensors relativ zu den Strukturen festgestellt ist, muss der Weg ermittelt werden, welcher gefahren werden muss, um die zu messende Struktur zu erreichen (siehe Rahmen B in Abbildung 3.4). Während der Fahrt zu diesen Strukturen darf es nicht zu Berührungen zwischen Messspitze und Substrat kommen, da sonst deren Bruch riskiert wird. Dafür stehen die Nachricht der aktuellen Position sowie die Zielposition zur Verfügung. Es ist möglich, dass die Information zur Zielposition auch Informationen zu möglichen Hindernissen auf dem Substrat (wie z.B. andere Strukturen) beinhaltet.

Aktorik (C-Problem)

Vor dem A-Problem ist ein Aufbringen einer mechanischen Energie auf den Kraftsensor zu sehen (siehe auch Abbildung 3.6). Dies kann eingesetzt werden, um die Verbindung zwischen Substrat und Kraftsensor herzustellen oder das Substrat und die Messspitze zu positionieren (siehe Rahmen C). Neben der Bewegung des Sensors ist auch eine vorausgehende Bewegung

Abbildung 3.6.: Bewegen des Kraftsensors vor der Lokalisierung

des Substrates wie in Abbildung 3.7 möglich. Auch die Kombination beider Bewegungen ist möglich.

Abbildung 3.7.: Bewegen des Substrats vor der Lokalisierung

3.4 Teillösungen

Für die Teilprobleme „Feststellen der Position zwischen Kraftsensor und Substrat“, „Berechnung eines sicheren Weges“ und die Wahl der Aktorik sind Lösungen zu finden und zu bewerten. Dabei werden die Unterprobleme „Feststellen der Position ohne Kontakt zwischen Kraftsensor und Substrat“ und „Feststellen der Position mit Kontakt zwischen Kraftsensor und Substrat“ aufgrund ihres unterschiedlichen Lösungsraumes als separate Teilprobleme betrachtet.

3.4.1 Feststellen der Position ohne Kontakt zwischen Kraftsensor und Substrat

Die in Abbildung 3.5 gezeigte Variation des A-Problems lokalisiert jeweils die Messspitze und das Substrat. Da die Lokalisierung des Substrates unabhängig von der Lokalisierung der Messspitze stattfinden werden kann, werden diese Aufgaben getrennt gelöst und bewertet.
-

Lokalisierung des Substrats

Die Lokalisierung des Substrates bietet einen großen Lösungsraum. Die in Kapitel 2.2 beschriebene Lokalisierung über eine optische Erfassung von Justagemarken (siehe Abbildung 3.8) bietet sich als eine Lösung an. Hier zeigt eine Kamera von oben auf das Substrat und findet mithilfe von einer Bildverarbeitung das Justagekreuz. Durch die feste Position der Kamera kann somit auf die Position des Substrates zurückgeschlossen werden.

Abbildung 3.8.: Optische Positionserkennung des Substrates mit fest angebrachter Kamera

Alternativ kann mit einer Laserprofilmessung den Abstand entlang einer Linie gemessen werden. Wird das Substrat mit einer definierten Geschwindigkeit bewegt, kann ein dreidimensionales Modell einer Referenzstruktur erzeugt werden, welches genutzt werden kann, um das Substrat zu lokalisieren (siehe Abbildung 3.9).

Abbildung 3.9.: Lokalisierung mittels Laserprofilmessung

Die Position des Substrates kann auch mithilfe von Abstandsmessungen zu Referenzstrukturen gewonnen werden. Dabei misst entweder ein kapazitiver oder optischer Abstandssensor

jeweils die Distanz zu einem Punkt auf dem Substrat. Das Substrat wird solange Abgefahren, bis einer Referenzstruktur identifiziert werden kann. Dieses Messprinzip kann allerdings nur den Abstand zu jeweils einem Punkt messen. Dies macht es notwendig, das Substrat so lange abzufahren, bis die Struktur gefunden wurde. Alternativ müsste die Messung manuell eingerichtet werden. Außerdem ist es mit dieser Methode schwer möglich, Referenzstruktur und zu vermessende Strukturen klar zu unterscheiden. Für die kapazitiven Messungen ist zudem eine Bewegung des Sensorsystems notwendig, um die Elektrode nah zu dem Substrat zu bringen.

Für eine zuverlässige Messung ist es notwendig, dass diese nicht bei verschiedenen Materialien des Substrates unterschiedliche Ergebnisse erzielen. Außerdem sollte die Messung nicht zu viel Zeit in Anspruch nehmen. Auch ein günstiger Kaufpreis und eine einfache Implementierung der Software ist wünschenswert. Eine Übersicht unter Einbeziehung dieser Kriterien bietet Tabelle 3.2:

Tabelle 3.2.: Übersicht über Vor- und Nachteile der Lösungen für die Lokalisierung des Substrats

<table>
<tr><th colspan="2">Messprinzip</th><th>Vorteile</th><th>Nachteile</th></tr>
<tr><td colspan="2">Optisches Messprinzip mit Kamera</td><td>Schnelle Messung
Keine Bewegung notwendig
hohe Objekfeldgröße</td><td>Mustererkennung notwendig
Materialabhängigket</td></tr>
<tr><td colspan="2">Laserprofilmessung</td><td>Hohe Positionsauflösung</td><td>Teure Anschaffung
Mustererkennung notwendig</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Punktuelle Abstands-messung</td><td>kapazitiv</td><td></td><td>Lange Messung
Sensorbewegung notwendig
Materialabhängigkeit</td></tr>
<tr><td>optisch</td><td>Sensor vorhanden</td><td>Lange Messung</td></tr>
</table>

Lokalisierung der Messspitze

Der Lösungsraum der Lokalisierung der Messspitze ist äußerst eingeschränkt. Eine optische Lokalisierung ist wegen der spiegelnden Oberfläche der Messspitze mit Unsicherheiten verbunden. Gleichzeitig müsste sowohl für die x-, als auch für die y-Achse ein Lokalisierungssystem angebracht werden, um die richtige Lokalisierung zu gewährleisten. Eine Abstandsmessung ist außerdem aufgrund der nur 50μm breiten Messspitze mit einer aufwändigen manuellen Kalibrierung eines Abstandssensors auf die Spitze verbunden.

Fazit

Bei den Lösungen zu diesem Teilproblem zeichnet sich ab, dass die Lokalisierung des Substrates und besonders die Lokalisierung der Messspitze nicht ohne erheblichen Implementierungsaufwand und mit hohen Kosten verbunden sind. Der eingeschränkte Lösungsraum der Lokalisierung der Messspitze zeigt, dass eine komfortable und schnelle Lokalisierung über dieses Teilproblem nicht möglich ist. Somit ist im Rahmen dieser Arbeit von diesen Lösungen abzusehen. Alternativ zu der Lokalisierung ohne Kontakt kann die relative Position auch über eine Vermessung einer Referenzstruktur mit dem Kraftsensor gewonnen werden.

3.4.2 Feststellen der Position über Kontakt zwischen Kraftsensor und Substrat

Zur Gewinnung der relativen Position zwischen Kraftsensor und Substrat ist es möglich, auf das Substrat aufgebrachte Referenzstrukturen anzufahren. Die Position der Referenzstruktur auf dem Substrat ist dabei dem System bekannt. Allerdings bietet die Messspitze lediglich eine Kraftmessung in x-Richtung an. Soll eine Referenzstruktur in dieser Richtung gemessen werden, so wird die Messspitze solange verfahren, bis ein Kraftausschlag gemessen wird. Für eine Positionierung ist aber sowohl die relative Position in x-Richtung, sowie in y-Richtung erforderlich. Um diese Information zu gewinnen, bieten sich verschiedene Referenzstrukturformen an.

Referenzstrukturen

Eine Einbuchtung in einer rechteckigen Justagestruktur wie in Abbildung 3.10 dargestellt, ermöglicht die Bestimmung der y-Position der Messspitze zu dem Substrat. Dabei fährt die Messspitze wiederholt an verschiedenen y-Abständen an die Referenzstruktur. Erreicht die Spitze die Einbuchtung, so muss hier vor dem Erreichen einer Kante ein längerer Weg in x-Richtung gefahren werden als zuvor. Dies führt zu dem Informationsgewinn, dass zwischen dem letzten und dem aktuellen Schritt die Kante in y-Richtung überwunden wurde. Hieraus erfolgt eine Ableitung der Positionsinformation. Das untere Ende der Einbuchtung ermöglicht durch die Wiederholung des Prozesses eine Erhöhung der gewonnenen Lokalisationssicherheit.

Abbildung 3.10.: Struktur mit Einbuchtung

Die Größe der y-Schritte ist dabei ein entscheidender Faktor für die Genauigkeit der Messung. Das Wählen von kleinen Schritten erhöht die Lokalisierungsgenauigkeit in y-Richtung, bedeutet jedoch auch eine längere Dauer des Lokalisierungsvorgangs. Die Größe der Referenzstruktur ist durch die charakteristische Größe c gegeben, welche die Größe der Referenzstruktur unabhängig der Form beschreiben kann. Diese ist jeweils in den Abbildungen 3.10

und 3.11 eingezeichnet. Bei der Auslegung dieser Größe ist zu beachten, dass die minimal zu fertigende Strukturgröße $30 - 50\,\mu$m beträgt.

Ein alternatives Prinzip für eine Referenzstruktur ist in Abbildung 3.11 dargestellt. Dabei werden durch mehrere Messungen sowohl an der schrägen, als auch an der geraden Kante Geraden gebildet. Deren Schnittpunkt miteinander liegt mit dem Eckpunkt der Kanten übereinander. Da die Position dieses Eckpunktes auf dem Substrat bekannt ist, kann daraus die relative Position der Messspitze zu dem Substrat gewonnen werden.

c
c
c
y
x
Schnittpunkt
Berechnete Geraden

Abbildung 3.11.: Struktur mit schrägen Kanten zur Positionsgewinnung über Geometrie

Andere Referenzstrukturen (zu sehen in Anhang A.4) führen eine Lokalisierung über ähnliche Prinzipien wie die zuvor Beschriebenen durch.

Bewertung

Für die optimale Auswahl einer Referenzstruktur ist eine Bewertung der Lösungen notwendig. Dabei ist die gewonnene Auflösung in y-Richtung ein entscheidender Faktor. Außerdem kann durch die Referenzstrukturen ein möglicher Winkelversatz des Substrats erkannt werden. Die verfügbare Winkelauflösung ist auch ein Kriterium zur Bewertung der Referenzstrukturen.

In Abbildung 3.12 ist zu sehen, dass die Messspitze aufgrund ihrer Breite schon früher die untere Kante der Bucht erkennt als erwartet. An der oberen Kante der Bucht wird mit der oberen Seite der Messspitze gerechnet, während an der unteren Seite der Bucht mit der unteren Seite der Messspitze gerechnet werden muss. Für die Bewertung wird allerdings die Dicke der Messspitze vorläufig vernachlässigt, da deren Einfluss in dem letztendlich zu implementierenden Algorithmus herausrechenbar ist.

Struktur
Obere Kante trifft Struktur
Messspitze
Untere Kante trifft Struktur

Abbildung 3.12.: Fehler durch die Breite der Messspitze

Für eine akkurate Bewertung wird auf 2 Verfahren für das Berechnen der y- und Winkelauflösungen gesetzt. Eine geometrische Betrachtung kann mithilfe von einigen Rahmenbedingungen Aussagen über y-Auflösung und besonders Winkelauflösungen geben. Eine flexiblere Betrachtung bietet eine Monte-Carlo-Simulation an.

Grundlagen der geometrische Betrachtung

Um die Vermessung der Referenzstrukturen geometrisch darzustellen, müssen einige Rahmenbedingungen festgelegt werden:

- Charakteristische Länge $c = 50\,\mu$m
- Vier Messungen für eine Struktur
- y-Abstand zwischen Messungen $20\,\mu$m
- x-Auflösung gegen Kante: $1\,\mu$m
- Die Dicke der Messspitze ist vernachlässigbar klein

Die Begrenzung auf vier Messungen mit einem y-Abstand von $20\,\mu$m weicht dabei von der tatsächlich später bestimmten Anzahl der Messungen und y-Schrittgröße ab. Diese wird aber hier so gewählt, dass keine Mittelwertbildung notwendig ist und somit erst die geometrische Betrachtung durchführbar wird. Durch die 4 Messungen wird eine Breite von $80\,\mu$m abgedeckt, damit sich die vier Messungen auf zwei charakteristische Längen optimal verteilen.

In der geometrischen Betrachtung ist der Einfluss der Wiederholungenauigkeit der y-Aktorik nicht dargestellt. Dies ist notwendig, da die Wiederholgenauigkeit zumindest bei der Buchtenstruktur eine stochastische Betrachtung erfordert, um entscheiden zu können, wann die Messspitze innerhalb der Bucht misst und wann nicht.

Für die geometrische Betrachtung wird die Struktur mit der Software GeoGebra gezeichnet. Sie wird um horizontale Geraden ergänzt, welche die vier Messungen darstellen. Neben die Schnittpunkte der Geraden mit der Struktur, also die Messpunkte, werden die äußeren Grenzen der x-Auflösung aufgetragen, indem die maximal ungenauen Punkte $0{,}5\,\mu$m sowohl

in die Struktur als auch aus der Struktur heraus angetragen werden. Der Bereich zwischen diesen beiden aufgetragenen Punkten gibt den Messfehler in x-Richtung an.

Damit die Positionierung korrekt ablaufen kann, ist auch eine Messung des Winkelversatzes des Substrates sinnvoll. Die durch die Vermessung der Substrate gewonnene Winkelgenauigkeit kann daraufhin durch das Verbinden der äußersten gegenüberliegenden Messpunktextreme bestimmt werden. Die Bestimmung der y-Position ist von der Struktur abhängig.

Geometrische Betrachtung der Struktur mit Einbuchtung

Wird an der Struktur mit Einbuchtung nur eine Kante vermessen, so liegt die y-Auflösung lediglich bei 20 μm. Durch den Einfluss der zweiten Kante wird diese Genauigkeit erhöht und somit eine Positionsauflösung von 10 μm bei den gewählten Rahmenbedingungen erreicht (siehe Abbildung 3.13). Die maximal mögliche Abweichung der Winkelmessung kann über das Verbinden der maximalen Abweichungen in x-Richtung gewonnen werden. Dabei werden die Punkte A' mit D'' und A'' mit D' verbunden und im Schnittpunkt der beiden Geraden der Winkel gemessen. Somit kann eine Winkelgenauigkeit von 3,82° erreicht werden.

Abbildung 3.13.: Geometrische Berechnung der Buchtenstruktur

Eine analytische Betrachtung der Auflösungen kann erst ab einer y-Schrittgröße $d_y \leq \frac{c}{2}$ bestimmt werden. Diese Bedingung ist notwendig, da ab einer y-Schrittgröße $d_y > \frac{c}{2}$ der Sprung der oberen Kante nicht mehr von dem der unteren Kante unterschieden werden kann. Zudem gilt weiterhin die Bedingung, dass von vier Messungen auszugehen ist und die Dicke der Messspitze vernachlässigbar ist. Die Wiederholgenauigkeit des y-Aktors ist dabei nicht beachtet. Sind diese Bedingungen erfüllt, so gilt für die y-Auflösung A_y:

$$A_y = \frac{d_y}{2} \tag{3.1}$$

Für das Erfüllen dieser Auflösung muss die Anzahl der Messungen dann erhöht werden, wenn die aufsummierte Länge der y-Schritte der vier Messungen die charakteristische Länge c nicht überschreitet. Dies ist notwendig, da sonst nicht beide Sprünge der Buchten gemessen werden könnten. Die resultierende Winkelauflösung A_{vers} ist abhängig von dem Abstand der äußersten Messpunkte und somit von der y-Schrittweite. Außerdem hat die x-Ungenauigkeit u_x einen Einfluss:

$$A_{vers} = 2 \cdot \arctan\left(\frac{2u_x}{3d_y}\right) \tag{3.2}$$

Diese Beziehung gilt allerdings nur, solange die Anzahl der Messungen auf 4 begrenzt ist, da sich sonst der Abstand zwischen dem obersten und dem untersten Messpunkt erhöht und es somit zu einer genaueren Winkelauflösung kommt.

Geometrische Betrachtung der Struktur mit schrägen Kanten

Die Struktur mit schrägen Kanten gewinnt ihre Positionsinformation über die Schnittpunktbildung zweier Geraden. Diese Geraden werden mithilfe der Messpunkte (in Abbildung 3.14 sind die Messungen an den Punkten A, B, C und D) erzeugt. Fehler können hier dadurch entstehen, dass die Richtung der resultierenden Gerade durch die Messungenauigkeiten falsch gewählt wird. Auch der Aufpunkt der Geraden kann durch falsche Messungen versetzt werden. In Abbildung 3.14 ist um den Eckpunkt der Struktur ein Viereck eingezeichnet, welches die Ungenauigkeit der Messung beschreibt. Dieses Viereck wird durch folgende Geraden aufgespannt: A'' nach B', A' nach B'', D' nach C'' und D'' nach C'.

Abbildung 3.14.: Geometrische Berechnung der Struktur mit schrägen Kanten

Der Abstand zwischen dem Eckpunkt und den äußersten Ecken des Vierecks beträgt dabei in y-Richtung $8\,\mu$m. Dies entspricht der resultierenden y-Auflösung. Die Winkelgenauigkeit kann über die Winkel zwischen den x-Ungenauigkeiten bei D (D' und D'') und den äußersten Eckpunkten des Vierecks abgelesen werden. Diese ist mit 4,27° ungenauer als die erzielte Auflösung bei der Buchtenstruktur.

Das Bilden und Schneiden der Geraden über eine analytische Betrachtung ermöglicht es, Beziehungen für die Auflösungen in y- und Winkelversatzrichtung anzugeben. Dabei gelten die gleichen Grundbedingungen wie für die geometrische Betrachtung. Hierfür werden die oben genannten Geraden in einer Parameterform dargestellt und die entsprechenden Schnittpunkte berechnet (Berechnung siehe Anhang A.7). Es stellt sich heraus, dass unter der Bedingung von lediglich vier Messpunkten die y-Auflösung A_y nur Abhängigkeiten von der x-Unsicherheit u_x zeigt.

$$A_y = 8u_x \tag{3.3}$$

Die Auflösung für die Erkennung eines Winkelversatzes des Substrates A_{vers} ist dagegen sowohl von der x-Unsicherheit u_x, der y-Schrittweite d_y, als auch dem y-Abstand der ersten Messung gegenüber der Ecke y_0 abhängig.

$$A_{vers} \approx \arctan\left(\frac{2u_x(2d_y + 4u_x - y_0)}{d_y(3d_y - y_0)}\right) + \cot^{-1}\left(\frac{(d_y + 4u_x)(3d_y - y_0)}{4u_x(d_y + u_x) - 2u_x y_0}\right) \tag{3.4}$$

In Abbildung 3.15 ist zu sehen, dass es besonders bei kleinen y-Schritten und einer hohen x-Ungenauigkeit zu wesentlichen Fehlern in der Winkelversatzerkennung kommt. In der Abbildung wird dabei für y_0 der Wert $1{,}5 \cdot d_y$ angenommen. Diese Annahme würde einer symmetrischen Verteilung der Messpunkte um die Ecke entsprechen.

Winkelauflösung in °

y-Schittlänge in μm

x-Genauigkeit in μm

Abbildung 3.15.: Winkelauflösung unter Variation der x-Genauigkeit und y-Schrittlänge

Bei einer langen y-Schrittlänge ist zu sehen, dass die x-Genauigkeit u_x eine kleinere Rolle für die Auflösung spielt als bei einer kurzen y-Schrittlänge. Dies ist dadurch zu begründen, dass der Abstand zwischen dem untersten Punkt und dem an der Ecke länger ist. Folglich werden die aufgespannten Winkel kleiner.

Bei dieser Berechnung wird nur die vertikale Kante für das Messen des Winkelversatzes genutzt. Da jedoch der Winkel zwischen der vertikalen und der schrägen Kante bekannt ist, kann diese Kante mitgenutzt werden, um die Genauigkeit zu erhöhen. Diese Kante besitzt eine Winkelauflösung von 5,74°. Die Kombinierte Auflösung beträgt somit

$$A_{Vers} = \frac{5,74^\circ + 4,27^\circ}{2 \cdot \sqrt{2}} = 3,54^\circ$$

Bei dieser Rechnung wird der Mittelwert gebildet (Division durch 2) und der Einfluss einer 2. Messung einberechnet (Division durch $\sqrt{2}$).

Übersicht der Ergebnisse der geometrischen Betrachtung

Mit einer charakteristischen Länge $c = 50\,\mu$m, vier Messungen pro Struktur mit einem y-Schrittabstand von $20\,\mu$m, einer Auflösung in x-Richtung von $1\,\mu$m werden 2 Strukturen geometrisch verglichen (siehe Tabelle 3.3). Die Buchtenstruktur erreicht sowohl eine schlechtere Winkelauflösung, als auch eine schlechtere Auflösung für die Lokalisierung in y-Richtung:

Tabelle 3.3.: Übersicht über die Auflösungen an einzelnen Strukturen nach geometrischer Betrachtung

	Buchtenstruktur	**Struktur mit schrägen Kanten**
y-Auflösung	$10\,\mu$m	$8\,\mu$m
Winkelauflösung	3,82°	4,27° (3,54° mit 2. Kante)
Strukturbreite in y-Richtung	$150\,\mu$m	$100\,\mu$m

Eine Bewertung mit flexibleren Rahmenbedingungen bietet eine Monte-Carlo-Simulation an.

Monte-Carlo-Simulation

Neben der x-Ungenauigkeiten kann es auch durch die y-Aktorik zu einer Wiederholungenauigkeit kommen, welche die Messung beeinflusst. Die geometrische Betrachtung kann diese Information nicht beschreiben. Die Einbeziehung der y-Wiederholgenauigkeit für die Struktur mit Einbuchtung benötigt einen stochastischen Ansatz. Jedoch ist dies mit einer Monte-Carlo-Simulation möglich. Die Durchführung der Simulation erfolgt in Java (Ausgabe siehe Abbildung 3.16 und Erklärung im Anhang A.5). Dabei werden virtuell Messungen an einer Referenzstruktur durchgeführt und diese mit einem bestimmten gleichverteilten Fehler behaftet. Die Algorithmen zur Erkennung der y-Position sind jeweils implementiert. Deren Ausgabewerte werden mit der tatsächlichen Position verglichen und somit kann der Fehler der Messung bestimmt werden. In Abbildung 3.17 zeigt sich, dass die Struktur mit schräger Kante wesentlich robuster gegenüber fehlerhaften Messungen ist.

Abbildung 3.16.: Exemplarische Optische Ausgabe der Monte-Carlo-Simulation

Abbildung 3.17.: Ergebnisse der Simulation bei Variation der y-Wiederholungenauigkeit

Fazit der Bewertung

Die Monte-Carlo-Simulation zeigt, dass die Struktur mit schrägen Kanten gegenüber Ungenauigkeiten der y-Aktorik wesentlich robuster ist. Auch bei geringen Wiederholungenauigkeiten erzielt die Buchtenstruktur eine wesentlich ungenauere Lokalisierung in y-Richtung. Die Geometrische Betrachtung zeigt, dass die Buchtenstruktur eine etwas bessere Winkelauflösung aufweist. Jedoch kann die Winkelauflösung der Struktur mit schrägen Kanten verbessert werden, indem der Winkel der 2. Kante erfasst wird. Somit fällt die Wahl für die optimale Referenzstruktur auf die Struktur mit schrägen Kanten.

Anordnung der Struktur

Neben der x-y-Lokalisierung ist es sinnvoll, eine Verdrehung des Substrates festzustellen. Bei einer deutlichen Verdrehung kann die exakte Positionierung nicht mehr gewährleistet werden. Die Abschätzung der Winkelauflösungen beider Strukturen ergab, dass es mindestens zu einem Fehler von $A_{vers} > 3,82°$ kommt (siehe Tabelle 3.3). Über einen Weg von 5 cm (halbe Strecke eines 4"-Wafers) führt dies zu einem Fehler in der Positionierung um $d_{fehler} = 5\,\text{cm} \cdot \sqrt{2 - 2\cos(3,82°)} = 333,29\mu\text{m}$ (siehe Anhang A.7). Um die Winkelauflösung zu erhöhen und somit den Fehler zu verringern, kann eine zweite Struktur in einem gewissen Abstand zu der anderen Referenzstruktur auf das Substrat gebracht werden. Nach der Messung der ersten Struktur wird zu dem erwarteten Punkt der zweiten Struktur gefahren. Darauf findet eine Vermessung der zweiten Referenzstruktur statt. Die daraus gewonnene Positionsinformation ist Grundlage zu der Berechnung des gesuchten Versatzes. Liegen die zwei Strukturen auf einem 4"-Wafer mit dem Abstand $d_s = 3\,\text{cm}$ auseinander, besitzen diese eine Messungenauigkeit in x-Richtung $u_x \leq 1\mu\text{m}$ und haben einer y-Auflösung $A_y < 10\mu\text{m}$, so führt das zu einer Winkelversatzauflösung von $A_{vers} \leq \arctan(\frac{2u_x}{d_s - 2A_y}) = 0,00382°$ (siehe Anhang A.7). Der hier entstehende Fehler über eine Strecke von 5 cm ist mit $d_{fehler} = 3,33\mu\text{m}$ innerhalb der Anforderungen für die Positionierung.

Diese Methode wird implementiert, jedoch hat der Nutzer die Wahl, dieses Feature abzuschalten, falls er beispielsweise ein kleines Substrat ohne Platz für eine zweite Referenzstruktur vermessen will.

3.4.3 Berechnung eines sicheren Weges aus Position und Zielposition

Sind auf dem Substrat die zu vermessenden Strukturen in einem gewissen Raster angeordnet, so können diese umfahren werden, indem die Wege zwischen den Messstrukturen gefahren werden. Hierfür muss dem Programm eine Karte verfügbar sein, um zu wissen, wo sich Messstrukturen befinden, welche umfahren werden sollen. Dies kann über das Importieren einer CAD-Zeichnung oder über die Wahl von standardisierten Rastern für die Messstrukturen geschehen.

Alternativ kann auch die Messspitze entweder manuell oder durch eine neu anzubringende z-Aktorik angehoben werden. Damit kann es nicht mehr zu einer Berührung zwischen Strukturen und Messspitze kommen. Der gewünschte Zielort müsste dann allerdings direkt über Koordinaten relativ zu den Referenzpunkten dem System übergeben werden.

Da der besondere Augenmerk der Arbeit auf der Positionierung in x- und y-Richtung liegt und ein manuelles Anheben der Messspitze nicht mit großem Aufwand verbunden ist, wird vorerst auf die Implementierung des Messstrukturrasters und des CAD-Imports verzichtet. Die Eingabe der Koordinaten im Bezug auf den Referenzpunkt löst das Problem und erfüllt alle Forderungen.

3.4.4 Aktorik

Einen wesentlichen Anteil bei der Positionierung stellt die Aktorik dar. Die aktuell verbaute Aktorik am x-y-Tisch bietet eine Auflösung von $1\mu\text{m}$ und eine Wiederholgenauigkeit von

5 μm. Der Hersteller für die Linearaktorik, mit welcher die Messspitze bewegt wird, gibt eine Auflösung von < 1nm und eine minimale Schrittgröße von 50 nm an [27].

Wird die Messspitze in Kombination mit jener Aktorik entlang der x-Achse eingesetzt, so kann die Kante einer festen Struktur in x-Richtung erkannt werden. Die Genauigkeit dieser Kombination lässt sich durch einen Vorversuch bestimmen. Dabei wird wiederholt an jeweils eine feste Struktur herangefahren und die Weg-Kraft-Kennlinie gemessen.

Abbildung 3.18.: Ausschnitt einer Messung mit Messspitze an fester Struktur

Trifft der Sensor auf die Kante, so lässt sich eine lineare Funktion messen. Der Mittelwert der Steigung liegt bei $5,9\,\mathrm{N\,m^{-1}}$ mit einer Standartabweichung von $s = 0,142\,\mathrm{N\,m^{-1}}$. Der Schnittpunkt mit der x-Achse lässt auf einen Kontakt zwischen Messspitze und Struktur zurück schließen. Dieser weicht dabei auch bei mehreren Messungen nicht um mehr als 0,5 μm ab und zeigt eine Standardabweichung von $s = 143,63$ nm. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Kraftsensor-Nanoaktor-Kombination eine x-Genauigkeit von mindestens 0,5 μm liefert.

Werden die angegebenen Werte von der Aktorik eingehalten, so müssen diese für eine akkurate Positionierung und Automatisierung nicht ausgetauscht werden und können genutzt werden.

3.5 Gesamtkonzept

Das Feststellen der Position über den Kontakt zwischen Substrat und Kraftsensor bietet gegenüber der kontaktlosen Lokalisierung einige Vorteile.

- **Keine Erweiterung des Messplatzes notwendig:** Die kontaktlose Lokalisierung benötigt eine Erweiterung des Messplatzes mit Sensorik. Dies ist mit Kosten und Aufwand verbunden.
- **Keine spezielle Lokalisierung des Messspitze notwendig:** Für die Lokalisierung der Messspitze ist der Lösungsraum sehr klein und bietet keine Lösung ohne wesentliche

Nachteile. Die Lokalisierung über den Kontakt erzeugt automatisch die benötigte relative Position zwischen Kraftmessspitze und Substrat und muss somit dieses Teilproblem nicht implementieren.

Nutzen vorhandener Aktorik und Sensorik

Vermessen der Struktur Struktur mit schrägen Kanten

Erkennen der Kanten und Bilden des Schnittpunktes

Positionierung mit Anheben der Messspitze und direktem Verfahren an die Zielposition

Abbildung 3.19.: Gesamtkonzept

α

Abbildung 3.20.: Winkel in der Referenzstruktur

Dies führt zu der Auswahl des folgenden Gesamtkonzeptes (siehe Abbildung 3.19): Die Lokalisierung der Messspitze erfolgt über den Kontakt zwischen Messspitze und Substrat. Um auch die Lokalisierung in y-Richtung durchzuführen, wird die Referenzstruktur mit einer schrägen und einer vertikalen Kante genutzt. Dabei ist der Winkel zwischen den Kanten $\alpha = 45°$ (siehe Abbildung 3.20). Durch mehrere Messungen werden die Kanten erkannt und entlang dieser Geraden gebildet. Der Schnittpunkt der Geraden entspricht ideal der Ecke zwischen den Kanten. Bei ungenauen Messungen kann es zu Abweichungen kommen, welche jedoch nach den durchgeführten Berechnungen unter den geforderten Anforderungen bleiben werden. Die Hardware des Messplatzes bleibt dabei unverändert. Sowohl die vorhandene Sensorik als auch die verbaute Aktorik besitzen für die Lokalisierung eine ausreichende Genauigkeit.

Es steht dem Nutzer offen, eine zweite Referenzstruktur für eine bessere Winkelgenauigkeit einzusetzen. Falls eine solche zweite Referenzstruktur vorhanden ist, kann eine Vermessung dieser im Programm eingeschaltet werden. Das Anfahren dieser Referenzstruktur und die Berechnung des Winkelversatzes geschieht automatisch.

Nach der Positionsbestimmung muss die Messspitze manuell durch den Bediener um einen vorgegebenen Wert angehoben werden, um Kollisionen der Messspitze mit den zu vermessenden Strukturen zu vermeiden. Daraufhin verfährt die x-y-Aktorik das Substrat direkt zu dem vom Nutzer angegebenen Punkt, wo nach dem Herunterfahren der Messspitze die Messung durchgeführt werden kann. Der für die Automatisierung notwendige Algorithmus wird in LabView umgesetzt und in das vorhandene Programm des Messplatzes eingearbeitet.

4 Ausgestaltung und Programmierung

Die Umsetzung der Automatisierung ist in zwei Bereiche aufzuteilen: Das Wählen der Größe der Referenzstruktur, um einen Kompromiss aus Lokalisierungsdauer und Lokalisierungsgenauigkeit zu treffen, und die Implementierung des Algorithmus zum Finden des Schnittpunktes und somit der Referenzposition.

4.1 Auslegen der Referenzstruktur

Für das Bestimmen der optimalen Größe der Referenzstruktur ist die schon für die Bewertung eingesetzte Monte-Carlo-Simulation hilfreich. Bei der Wahl der Strukturgröße spielt auch die Größe der y-Schritte eine Rolle. Bleibt diese Größe bei einer Vergrößerung der Struktur gleich, so erhöht sich die Genauigkeit der Lokalisierung. Gleichzeitig wird die Dauer des Lokalisierungsvorganges länger. Deswegen ist es notwendig, einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Lokalisierungsdauer zu finden. Der Wert der y-Schrittlängen ist allerdings auch nach dem Programmieren einfach zu verändern, während das Herstellen eines neuen Substrates mit anderen Referenzstrukturen mit Aufwand verbunden ist. Wesentliche Kriterien für eine optimale Strukturgröße sind somit eine kurze Lokalisierungsdauer und eine hohe Lokalisierungsgenauigkeit.

Abbildung 4.1 zeigt die Abhängigkeit zwischen charakteristischer Länge c, y-Schrittlänge d_y und der y-Genauigkeit (Die in der Abbildung genutzten Werte für die Wiederholgenauigkeiten und Messgenauigkeiten sind für eine bessere Anschaulichkeit höher als tatsächlich gewählt). Hierbei ist deutlich zu sehen, dass bei steigender y-Schrittgröße eine größere Struktur notwendig ist, um nutzbare Ergebnisse zu erlangen. Beispielhaft kann dies bei einer charakteristischen Länge von 300 μm gesehen werden: Bei einer y-Schrittgröße von 11 μm wird eine y-Ungenauigkeit von 3,416 μm berechnet, wobei diese bei einer y-Schrittgröße von 70 μm 9,25 μm beträgt.

Abbildung 4.1.: Ergebnisse der Simulation für die y-Ungenauigkeit bei Variation der y-Schrittgröße und der charakteristischen Länge bei einer y-Wiederholgenauigkeit von $10\,\mu$m und einer x-Messgenauigkeit von $5\,\mu$m (Werte über $15\,\mu$m werden schwarz angezeigt)

Aus Vorversuchen und externen Quellen wurde bestimmt, dass die x-Genauigkeit bei $1\,\mu$m liegt und die y-Wiederholgenauigkeit $5\,\mu$m ist. Nach einer Simulation unter diesen Bedingungen werden die Punkte mit der geringsten y-Ungenauigkeit für jede charakteristische Länge des Plots erfasst. Diese Punkte bilden einen Zusammenhang zwischen der y-Schrittgröße d_y und der charakteristischen Länge c. Dieser lässt sich durch eine quadratische Funktion approximieren:

$$d_y = 1,2268 \cdot 10^{-5} c^2 - 0,0163c + 0,6253 \tag{4.1}$$

Diese Funktion kann für die gegebenen Bedingungen eine Auskunft darüber geben, welche y-Schrittweiten d_y für entsprechende charakteristische Längen c als optimal zu erwarten sind. Um die notwendige Anzahl an Messpunkten zu minimieren wird die Anzahl der Messungen pro charakteristische Länge $r = \frac{c}{d_y}$ eingeführt. Die resultierende Gleichung für r

$$r = \frac{c}{1,2268 \cdot 10^{-5} c^2 + 0,0163c + 0,6253} \tag{4.2}$$

läuft für $c \to \infty$ gegen 0. Damit ist davon auszugehen, dass eine möglichst große Referenzstruktur die besten Ergebnisse bei wenig Schritten liefert. Gleichzeitig kann die Größe der Referenzstruktur in der Software variabel einstellbar bleiben, um auch auf kleineren Substraten mithilfe kleinerer Referenzstrukturen die Automatisierung der Positionierung zu erlangen. In Abbildung 4.2 wird ebenfalls ersichtlich, dass bei sehr kleinen charakteristischen Längen r auch klein ist. Jedoch ist hier wenig Robustheit gegenüber eventuell auftretenden Mess- und Aktorikfehlern gegeben.

Abbildung 4.2.: Schritte pro charakteristische Länge

Außerdem ist zu beachten, dass die Zeit für eine Lokalisierung möglichst klein gehalten werden sollte. Limitierender Faktor ist hierbei die notwendige Bewegung in x-Richtung. Diese kann nur langsam durchgeführt werden, um ein Überlasten der Messspitze zu verhindern. Somit muss ein Kompromiss in der Größe der Referenzstruktur gefunden werden. Auf einem Substrat, welches für die Charakterisierung und das Testen der Automatisierung prozessiert wird, werden Referenzstrukturen in 50 μm, 400 μm und 4000 μm gewählt (siehe Abbildung 4.3). Während des Testens zeigt sich, dass sich die Struktur mit einer charakteristischen Länge von 400 μm für die manuelle Vorpositionierung und eine kurze Lokalisierungsdauer am besten eignet.

Abbildung 4.3.: Maske des zum Testen der Lokalisierung und Positionierung erstellten Substrates

4.2 Lokalisierungsalgorithmus

Das Vermessen der Referenzstruktur geschieht durch mehrere Messungen in x-Richtung, die jeweils zueinander einen Abstand in y-Richtung besitzen. Bei jeder Messung wird die Messspitze solange positiv in x-Richtung bewegt, bis ein Kraftschwellenwert überschritten

wird. Daraufhin wird die Position des Linearaktors abgerufen und neben dem eingestellten y-Versatz gespeichert. Damit die Ergebnisse vergleichbar bleiben, wird die Messspitze zurück auf die Ursprungsposition in x-Richtung gefahren. Ist diese Position erreicht, kommt es zu einer Erhöhung des y-Versatzes durch eine Verschiebung des Substrates in y-Richtung. Dabei ist der Startpunkt der ersten Messung der Koordinatenursprung. Die einzelnen Schritte sind in Abbildung 4.4 aufgezeichnet.

Abbildung 4.4.: Ablaufdiagramm zur Vermessung der Referenzstruktur

Die Schrittweiten in x- und y-Richtung, der Kraftschwellenwert und die Anzahl der Messungen sind durch den Nutzer in der LabView-Oberfläche einstellbar.

Nachdem die Messwerte erfasst sind, kann der Algorithmus zur Erkennung der Kanten und der darauf folgenden Schnittpunktbildung zur Lokalisierung ausgeführt werden. Da durch Ungenauigkeiten in der Messung oder der Aktorik Fehler in den Messungen auftreten können, wird ein Moving-Average-Filter auf die Ergebnisse angewandt. Beispielhaft ist dies an Abbildung 4.5 zu sehen. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass wesentliche Abweichungen

Abbildung 4.5.: Messergebnise aus der Simulation vor (links) und nach (rechts) der Anwendung des Moving-Average Filters

im Winkel zwischen zwei Messpunkten ausgeglichen werden können. Dies ist im späteren Verlauf des Algorithmus äußerst wichtig, um verlässliche Ergebnisse zu erlangen. Sind jedoch nur wenige Messwerte vorhanden, so kann eine Moving-Average Filterung den Sprung zwischen schräger und vertikaler Kante unsauber machen und somit die Lokalisierung verschlechtern. Deswegen ist es notwendig, die Länge des Moving-Average Filters so zu bestimmen, dass das Messergebnis erhalten bleibt, oder ihn gegebenenfalls abzuschalten.

Für die Bildung der Geraden werden die Winkel zwischen den einzelnen Messpunkten berechnet und der maximale Winkel bestimmt. Darauf folgt die Bildung der Geraden mithilfe der Winkel zwischen den Messpunkten. In Algorithmus 1 wird die Methode zum Gewinnen der Punkte, welche zu einer Gerade zusammengefasst werden sollen, dargestellt. Dabei werden als erstes die maximalen und minimalen Winkel zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Messpunkten gesucht (Zeilen 1 und 2 in Algorithmus 1). Der maximal gefundene Winkel α gibt die obere Grenze und $\frac{2}{3}\alpha$ die untere Grenze eines Annahmebereiches an (siehe Abbildung 4.6). Liegt ein Winkel zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messpunkten innerhalb dieses Bereiches, so wird angenommen, dass der erste der zwei Messpunkten zu der schrägen Kante gehört (Zeile 7); er wird dann in einem Zwischenspeicher abgespeichert (Zeile 8). Wird die Bedingung nicht mehr erfüllt, kommt es, falls der Zwischenspeicher mehr als einen Punkt enthält (Zeile 11), zu der Erzeugung einer Geraden in Parameterform (Zeile 12) und der Zwischenspeicher wird geleert (Zeile 13). Dabei bildet der Mittelwert aller Ortsvektoren (entspricht den Messpunkten selbst) den Ortsvektor der Geraden. Der Richtungsvektor der Geraden ist der Mittelwert aller Richtungsvektoren zwischen jeweils zwei aufeinanderfolgenden Punkten im Zwischenspeicher. Für die Erkennung der Geraden an der vertikalen Kante spannt der minimale Winkel mit einer vorher bestimmten Toleranz das Akzeptanzgebiet auf (Zeilen 17-27).

Nach dem Durchlaufen dieses Algorithmus werden die gewonnenen Geraden nochmals verglichen und dabei Geraden mit ähnlichem Winkel zusammengefasst. Dies führt zu einer Verbesserung des Messergebnisses. Durch die Nutzung der Parameterform für die Geraden

Abbildung 4.6.: Annahme- und Ablehnungsbereich der Schrägen Kante aufgespannt durch den Maximalen Winkel α

ist die Bestimmung des Schnittpunktes zwischen den beiden Geraden analytisch möglich. Der berechnete Schnittpunkt dient nach einer Koordinatensystemtranslation als Nullpunkt des Koordinatensystems.

Der Winkel der errechneten vertikalen Gerade kann für Winkelversatzinformationen ausgewertet werden. Falls der Nutzer eine genauere Information über den Winkelversatz erfahren will, so kann er dies vor dem Starten der Automatisierung auswählen. Geschieht dies, verfährt der Messstand nach der Messung der ersten Referenzstruktur zu einer weiteren Referenzstruktur und führt dort wiederholt den Lokalisierungsalgorithmus durch. Da der Abstand der Referenzstrukturen zueinander dem System übergeben wird, kann damit der Versatz des Winkels berechnet werden. Darauf kann der Nutzer manuell den Winkelfehler ausbessern, muss jedoch danach nochmals eine Lokalisierung durchführen.

4.3 Positionierung

Nach der Lokalisierung ist die Position in dem von der Ecke der Referenzstruktur aufgespannten Koordinatensystem bekannt. Bei jeder Bewegung der Aktoren muss die Veränderung der Position mit aufgenommen werden. Somit ist zu jeder Zeit die aktuelle Position bekannt. Dies ist notwendig, damit auch nach der ersten Positionierung an eine Messstruktur weitere Strukturen ohne erneute Lokalisierung angefahren werden können. Bevor die Positionierung mithilfe des x-y-Tischs durchgeführt wird, wird der Nutzer zum Anheben der Messspitze aufgefordert, um Kollisionen zwischen Messspitze und anderen Strukturen zu vermeiden.

```
input   : Moving Average gefilterte Arrays mit x und y-Messwerten M = (X,Y)
output  : Mehrere Geraden in Vektorform
1  maximalerWinkel ←FindeMaximalenWinkel(M);
2  minimalerWinkel ←FindeMinimalenWinkel(M);
3  for (X,Y) ∈ M do
4      if (X,Y)_vorgehend existiert then
5          α ←BerechneWinkel((X,Y),(X,Y)_vorgehend);
6          if Phase in Schräge then
7              if α zwischen maximalerWinkel und 2/3 · maximalerWinkel then
8                  (X,Y)_vorgehend zu zwischenspeicher hinzufügen;
9              end
10             else
11                 if zwischenspeicher hat mehr als 1 Punkt then
12                     ErzeugeNeueGerade(zwischenspeicher);
13                     leere zwischenspeicher;
14                 end
15                 Phase in Vertikale
16             end
17         else if Phase in Vertikale then
18             if α zwischen minimalerWinkel und 1/3 · maximalerWinkel then
19                 (X,Y)_vorgehend zu zwischenspeicher hinzufügen;
20             end
21             else
22                 if zwischenspeicher hat mehr als 1 Punkt then
23                     ErzeugeNeueGerade(zwischenspeicher);
24                     leere zwischenspeicher;
25                 end
26                 Phase in Schräge
27             end
28     end
29     (X,Y)_vorgehend ← (X,Y);
30 end
```

Algorithmus 1 : Bildung der Geraden

5 Charakterisierung und Ausblick

Die Charakterisierung der Lokalisierungs- und Positionsgenauigkeit gestaltet sich als schwierig, da hierfür eine Sensorik optimal wäre, welche die Positionen zwischen Substrat und Kraftmessspitze aufnehmen kann. Diese Sensorik würde einer Lösung des Teilproblemes „Feststellen der Position ohne Kontakt zwischen Kraftsensor und Substrat“ entsprechen. Da allerdings a priori die Entscheidung gegen eine Umsetzung einer Lösung dieses Teilproblems gefällt wurde, ist auch diese Sensorik nicht vorhanden. Somit muss die Charakterisierung mit vorhandener Sensorik durchgeführt werden. Dafür wurde ein Substrat mit einigen Teststrukturen erstellt. Auf dieses sind neben den Referenzstrukturen einige Strukturen aufgebracht, welche genutzt werden können, um die Positionierungsgenauigkeit zu messen.

5.1 Genauigkeit der Lokalisierung

Für eine Untersuchung der Lokalisierungsgenauigkeit des eingesetzten Verfahrens werden wiederholt Lokalisierungen an einer Referenzstruktur durchgeführt. Dabei wird immer die y-Richtung des Lokalisierungsvorganges zwischen den Messungen verändert. Somit muss nach einer Messung die Messspitze nicht zurück gefahren werden, sondern es wird während der Fahrt zurück eine weitere Messung durchgeführt. Ein Messvorgang mit $N = 15$ Messungen ergab eine Streuung in X-Richtung von $s_x = 0,4625\,\mu$m und eine Streuung in y-Richtung von $s_y = 1,570\,\mu$m. Die Streuung gibt dabei lediglich die Wiederholgenauigkeit an. Die Positionsgenauigkeit kann mit dieser Methode leider nicht charakterisiert werden. Wird angenommen, dass das Mittel der Werte mit der korrekten Position übereinstimmt, liegen die gemessenen Werte innerhalb der Anforderungen und decken sich mit den erwarteten Werten der Monte-Carlo-Simulation.

5.2 Genauigkeit der Positionierung

Die Positionierung kann durch Fehler sowohl in der Lokalisation, als auch in der Positionierungsaktorik mit Fehlern behaftet werde werden. Diese Genauigkeit kann über das Substrat mit den Teststrukturen gemessen werden. Dafür sind auf dem Substrat im Abstand von $100\,\mu$m Strukturen aufgebracht, welche jeweils $50\,\mu$m breit sind (siehe Abbildung 5.1). Der Abstand zwischen den einzelnen Strukturen und der Referenzstruktur kann aus dem CAD-Programm, in welchem die Masken für das Substrat erstellt wurden, abgelesen werden. Mithilfe dieser Information wird eine Struktur angefahren. Daraufhin kann optisch überprüft werden, ob die Messstruktur getroffen wird, oder eine benachbarte Struktur erreicht wird. Hierbei zeigt die Messung, dass eine genaue Positionierung nicht gelingt. Es treten Fehler auf, welche größer als $100\,\mu$m sind.

Da die Ergebnisse der Wiederholgenauigkeit der Lokalisierung nicht auf eine dort liegende Fehlerquelle hindeuten, ist die Ursache die Ungenauigkeit der x-y-Aktorik. Um diese zu messen wird eine Lokalisierung durchgeführt und daraufhin ein Weg abgefahren, bei welchem der Start und Endpunkt gleich sind. Wird nach der Lokalisierung ein Quadrat mit Seitenlängen von 10 mm abgefahren, so ist danach ein Versatz von $17\,\mu$m in y-Richtung und $21\,\mu$m in

Abbildung 5.1.: Markierungen auf dem Substrat mit Abstand 100 μm für die Verifizierung der Positionierung

x-Richtung durch eine wiederholte Lokalisierung zu messen. Bei einem Weg mit fünf Schritten und einem gesamten Laufweg von 22,37 mm in x-Richtung und 20 mm in y-Richtung kommt es zu einer Abweichung von 44 μm in y-Richtung und 36 μm in x-Richtung. Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, das die x-y-Aktorik nicht die angegebenen Genauigkeiten erfüllen kann. Mögliche Ursachen für dieses Fehlverhalten sind bekannt und werden bearbeitet. Dieses ist allerdings nicht teil dieser Arbeit. Alternativ kann eine zweite Linear-Stage genutzt werden.

5.3 Genauigkeit der Winkelversatzerkennung

Das Vermessen einer einzelnen Referenzstruktur bringt auch die Information über einen möglichen Winkelversatz mit. Um die Genauigkeit dieser Messung festzustellen, wurden einige Messungen bei keinem für das Auge sichtbaren Winkelversatz durchgeführt. Dies wird als Grundlage für weitere Messungen genutzt, welche um einen definierten Winkel versetzt sind (siehe Abbildung 5.2). Dabei kann dieser Versatz auf $5'$ genau eingestellt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.1 zu sehen.

Tabelle 5.1.: Ergebnisse zur Charakterisierung der Winkelauflösung

Relative Winkeländerung	Absoluter Fehler	Relativer Fehler zu 0°	Standardabweichung
2,5°	0,1073°	4,29%	0,1738°
5°	0,165 911°	3,32%	0,1785°
10°	0,0908°	0,91%	0,2939°

Diese Messungen können lediglich eine Aussage über die relative Erkennung der Winkeländerung treffen. Jedoch legen sie nahe, dass ein faktisch störender Winkelversatz erkannt werden und dem Nutzer gemeldet werden kann, sodass eine korrigierende Justierung der Verdrehung notwendig ist.

Abbildung 5.2.: Drehrichtung des Substrates bei der Messung

5.4 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mögliche Ursachen für die Adhäsionskräfte zwischen Messspitze und Struktur untersucht und Empfehlungen gegeben, wie diese verzerrenden Effekte vermindert werden können. Dabei stellt sich heraus, dass besonders Van-der-Waals-Kräfte und Kapillarkräfte einen Einfluss auf die bei den Messungen auftretende Hysterese haben. Zu der Verminderung der Van-der-Waals-Kräfte bietet sich eine Beschichtung der Strukturen oder der Messspitze an. Um geringere Kapillarkräfte zu erreichen wird eine Reduzierung der Luftfeuchtigkeit empfohlen.

Neben der Feststellung der Adhäsionseffekte wurde eine Lokalisierungsmethode gefunden, welche ohne weitere Modifikation des Messsplatzes Lokalisierung in x-Richtung genauer als 0,5 μm und in y-Richtung genauer als 2 μm erlaubt. Diese Werte sind wesentlich genauer als die Geforderte Genauigkeit von 50 μm. Bei einem Winkelversatz des Substrates kann dieser mit einer Wiederholgenauigkeit $< 0,3^\circ$ an einer Referenzstruktur festgestellt werden. Falls ein genauerer Wert gewünscht ist, kann auf das Substrat eine zweite Referenzstruktur aufgebracht werden und mit einem implementierten Algorithmus der Winkelversatz festgestellt werden. Bei einer charakteristischen Länge von $c = 400\,\mu$m dauert die Messung nicht länger als 2 Minuten. Unabhängig von der gewählten Lokalisierungsmethode ist eine Positionierung innerhalb der geforderten Genauigkeiten nicht möglich. Dies ist mit der ungenauen vorgegebenen x-y-Aktorik zu begründen. Das Programm, welches wie gewünscht in LabView implementiert wurde, ist jedoch so modular aufgebaut, dass nach Einbau einer feineren x-y-Aktorik eine Anpassung mit nur geringem Aufwand durchzuführen ist. Dem Nutzer steht es zudem frei, die Größe der Referenzstruktur zu variieren. Um den Lokalisierungsalgorithmus mit verschiedenen Referenzstrukturgrößen zu nutzen, muss lediglich die charakteristische Größe c eingegeben werden. Mithilfe dieser Größe wird automatisch die optimale Schrittgröße und der Laufweg für die Messung berechnet.

Um Messungen für den Nutzer zu erleichtern, könnte die Software so erweitert werden, dass zu vermessende Strukturen, welche in einem vorgegeben festen Raster angeordnet sind, ohne exakte Koordinaten, sondern nur mit der Angabe der Position im Raster anfahrbar werden.

Abbildung 5.3.: Messspitze bei der Vermessung einer Referenzstruktur

Dafür müsste ein einheitliches Raster entwickelt werden und dieses in der Implementierung als Referenz abgespeichert werden.

Die derzeitige Positionierung in z-Richtung ist weiterhin manuell zu tätigen. Hier würde eine Erweiterung des Messstandes mit einer z-Aktorik dazu führen, dass theoretisch nach einer anfänglichen Kalibrierung an der Referenzstruktur eine Messung eines kompletten Substrates völlig automatisiert durchgeführt werden kann. Derzeit muss vor einer Positionierung die Messspitze noch manuell angehoben und nach dem Erreichen des Zieles manuell auf die korrekte Höhe gebracht werden.

Literaturverzeichnis

[1] Quednau, S.; Dassinger, F.; Hottes, M.; Stegmann, C.; Ensinger, W. und Schlaak, H. F. *Integration und Charakterisierung von Nanostrukturen in Mikrosysteme für sensorische Anwendungen*. In: „MikroSystemTechnik Kongress 2013 Proceedings“. 2013. URL: http://www.vde-verlag.de/proceedings-en/453555153.html.

[2] Institut für Elektromechanische Konstruktionen, TU Darmstadt. „Elektronenrastermikroskopaufnahme einer Nano-Federelementen-Struktur“.

[3] FemtoTools. *The Working Principle of the FT-S Microforce Sensing Probes*. 2011. URL: http://www.femtotools.com/index.php?id=technology-probe.

[4] Israelachvili, Jacob N. *Intermolecular and Surface Forces, Second Edition: With Applications to Colloidal and Biological Systems (Colloid Science)*. Academic Press, 1992. ISBN: 0123751810. URL: http://www.sciencedirect.com/science/book/9780123751829.

[5] Ruths, Marina und Israelachvili, Jacob N. *Surface Forces and Nanorheology of Molecularly Thin Films*. Springer-Verlag, 04/2011, Seiten 107–202. ISBN: 978-3-642-15262-7. DOI: 10.1007/978-3-642-15263-4_13. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-15263-4_13.

[6] Livermore, Carol und Voldman, Joel. *MIT 6.777J/2.751 Material Property Database - Gold*. 2011. URL: http://www.mit.edu/~6.777/matprops/gold.htm.

[7] Palik, Edward D. *Handbook of Optical Constants of Solids, Vol. 1 (Academic Press Handbook)*. Academic Press, 1985. ISBN: 0125444206. URL: http://www.amazon.com/Handbook-Optical-Constants-Solids-Academic/dp/0125444206.

[8] Virginia Semiconductor. „The General Properties of Si, Ge, SiGe, SiO2 and Si3N“. 06/2002. URL: http://www.virginiasemi.com/pdf/generalpropertiessi62002.pdf.

[9] Sharma, S. P. *Adhesion coefficients of plated contact materials*. In: „Journal of Applied Physics“ 47.8 (1976), Seite 3573. DOI: 10.1063/1.323158.

[10] Ahmadi, G. „ME 437 PARTICLE TRANSPORT, DEPOSITION AND REMOVAL-I - London-van der Waals Force“. Clarkson University Course. Fall/2004. URL: http://web2.clarkson.edu/projects/crcd/me437/downloads/5_vanderWaals.pdf.

[11] Arai, F.; Ando, D.; Fukuda, T.; Nonoda, Y. und Oota, T. *Micro manipulation based on micro physics-strategy based on attractive force reduction and stress measurement*. In: „Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots“. Institute of Electrical und Electronics Engineers, 1995, Seiten 236–241. ISBN: 0-8186-7108-4. DOI: 10.1109/IROS.1995.526166. URL: http://dx.doi.org/10.1109/IROS.1995.526166.

[12] Butt, Hans-Jürgen und Kappl, Michael. *Normal capillary forces*. In: „Advances in Colloid and Interface Science“ 146.1–2 (2009), Seiten 48–60. ISSN: 0001-8686. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2008.10.002. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001868608001899.

[13] WEI, Zheng und ZHAO, Ya-Pu. *Growth of liquid bridge in AFM*. In: „Journal of Physics D: Applied Physics“ 40.14 (07/2007), Seiten 4368–4375. DOI: 10.1088/0022-3727/40/14/036. URL: http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/40/14/036.

[14] RABINOVICH, Yakov I.; ESAYANUR, Madhavan S. und MOUDGIL, Brij M. *Capillary Forces between Two Spheres with a Fixed Volume Liquid Bridge: Theory and Experiment*. In: „Langmuir“ 21.24 (11/2005), Seiten 10992–10997. DOI: 10.1021/la0517639. URL: http://dx.doi.org/10.1021/la0517639.

[15] DITHEY, Ulrich und BRANDENBURG, Anette. *Montage hybrider Mikrosysteme: Handhabungs- und Fügetechniken für die Klein- und Mittelserienfertigung*. Springer, 2005. ISBN: 3540237062. URL: http://www.springer.com/engineering/production+engineering/book/978-3-540-23706-8.

[16] SCHACHLER, Dipl.-Ing. (FH) Ralph und ROGGE, Dipl.-Ing. (FH) Martin. *Hochgenaue Mehrfachmontage von großen opto-mechanischen Baugruppen*. In: „MikroSystemTechnik KONGRESS 2009 Proceedings“. Berlin, 10/2009. URL: http://www.vde-verlag.de/proceedings-de/453183087.html.

[17] REMBE, C. und MULLER, R.S. *Measurement system for full three-dimensional motion characterization of MEMS*. In: „Journal of Microelectromechanical Systems“ 11.5 (10/2002), Seiten 479–488. DOI: 10.1109/JMEMS.2002.803285. URL: http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2002.803285.

[18] BURDESS, J.S.; HARRIS, A.J.; WOOD, D.; PITCHER, R.J. und GLENNIE, D. *A system for the dynamic characterization of microstructures*. In: „Microelectromechanical Systems, Journal of“ 6.4 (1997), Seiten 322–328. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/84.650129.

[19] GENTEMANN, Roland B. und VOGES, Edgar. „Flexible Montage optischer Mikrosysteme - Visuelle Positionierung und Prozesskontrolle“. 04/2005. URL: http://www.hft.e-technik.tu-dortmund.de/docs/publications/2005_04_nivip_gentemann.pdf.

[20] GENTEMANN, Dipl.-Ing. Roland B. *Automatisierte Präzisionsmontage faseroptischer Komponenten*. Dissertation. Technische Universität Dortmund, 02/2008. URL: https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/25103/7/Gentemann2.pdf.

[21] POPA, Dan O.; LEE, Woo Ho; MURTHY, Rakesh; DAS, Aditya N. und STEPHANOU, Harry E. *High Yield Automated MEMS Assembly*. In: „2007 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering“. Institute of Electrical und Electronics Engineers, 09/2007, Seiten 1099–1104. ISBN: 978-1-4244-1153-5. DOI: 10.1109/COASE.2007.4341718. URL: http://dx.doi.org/10.1109/COASE.2007.4341718.

[22] SUN, Lining; XIE, Hui; RONG, Weibin und CHEN, Liguo. *Task-Reconfigurable System for MEMS Assembly*. In: „Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation“. Institute of Electrical und Electronics Engineers, 2005, Seiten 832–837. ISBN: 0-7803-8914-X. DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570220. URL: http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570220.

[23] STAAB, Dipl.-Ing. Matthias. *MEMS-Analyzer (Motion-Analyzer) als Messplatz für Mikroaktoren*. Website. URL: http://www.emk.tu-darmstadt.de/index.php?id=1090.

[24] YAMAGATA, Y. und HIGUCHI, T. *A micropositioning device for precision automatic assembly using impact force of piezoelectric elements*. In: „Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation“. Institute of Electrical und Electronics Engineers, 1995, Seiten 666–671. ISBN: 0-7803-1965-6. DOI: 10.1109/ROBOT.1995.525360. URL: http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.1995.525360.

[25] Ferreira, A.; Cassier, C. und Hirai, S. *Automatic Microassembly System Assisted by Vision Servoing and Virtual Reality*. In: „IEEE/ASME Transactions on Mechatronics“ 9.2 (06/2004), Seiten 321–333. doi: 10.1109/TMECH.2004.828655. url: http://dx.doi.org/10.1109/TMECH.2004.828655.

[26] Chen, Heping; Xi, Ning und Li, Guangyong. *CAD-guided automated nanoassembly using atomic force microscopy-based nonrobotics*. In: „IEEE Transactions on Automation Science and Engineering“ 3.3 (07/2006), Seiten 208–217. doi: 10.1109/TASE.2006.876907. url: http://dx.doi.org/10.1109/TASE.2006.876907.

[27] SmarAct. *SmarAct Catalogue*. English. SmarAct.

Abbildungsverzeichnis

A Anhang

A.1 Anforderungsliste

Nr	F/W	Anforderung	Wert	Quelle	Datum
1 Messung					
1.1	F	Einflusses der Automatisierung auf den Messfehler	Beurteilen Dokumentieren	Aufgabenstellung	11.09.13
1.2	W	Veränderung des Messfehlers	Verringerung	Aufgabenstellung	11.09.13
2 Recherche					
2.1	F	Bearbeitung der Fehlerquellen	Identifizierung Verifizierung	Aufgabenstellung	04.09.13
2.2	F	Untersuchung der Auftretenden Kräfte	Elektrostatisch Adhäsion Kräfte bei Schaltkontakten	Aufgabenstellung	24.09.13
2.3	F	Einfluss der Verkippung der Strukturen	Berchechnung	Recherche	04.09.13
2.4	F	Einfluss des Versatzes des Sensors	Berchechnung	Recherche	04.09.13
3 Vorversuche					
3.1	W	Einfluss der Verkippung der Strukturen	Verifizierung	Recherche	04.09.13
3.2	W	Einfluss des Versatzes des Sensors	Verifizierung	Recherche	04.09.13
3.3	W	Einfluss materialabhängiger Unterschiede auf die Messergebnisse	Vorversuch		25.09.13
3.4	W	Einfluss der Kontaktfläche auf die Kontaktkräfte	Vorversuch		25.09.13
3.5	W	Einfluss der Geschwindigkeit des Messkopfes	Vorversuch		25.09.13
3.6	W	Einfluss der Verrutschen der Probe	Vorversuch		24.09.13
3.7	W	Einfluss von Kirechen der Materialschichten	Vorversuch		25.09.13
4 Automatisierung - Aktorik x-Achse					
4.1	F	Positionsgenauigkeit	$50\,\mu$m	Recherche	12.11.13
4.2	W	Positionsgenauigkeit	$< 50\,\mu$m	Recherche	12.11.13
4.3	F	Wiederholgenauigkeit	$50\,\mu$m	Recherche	12.11.13
4.4	W	Wiederholgenauigkeit	$< 50\,\mu$m	Recherche	12.11.13
4.5	F	Nutzung der vorhanden Grobaktorik	$5\,\mu$m	Besprechung	11.09.13
4.6	W	Nutzung der vorhanden Feinaktorik	Genauigkeit:5,0 nm	Besprechung	12.11.13
5 Automatisierung - Aktorik y-Achse					
5.1	F	Positionsgenauigkeit	$50\,\mu$m	Recherche	12.11.13
5.2	W	Positionsgenauigkeit	$< 50\,\mu$m	Recherche	12.11.13
5.3	F	Wiederholgenauigkeit	$50\,\mu$m	Recherche	12.11.13
5.4	W	Wiederholgenauigkeit	$< 50\,\mu$m	Recherche	12.11.13
5.5	F	Nutzung der vorhanden Grobaktorik	$5\,\mu$m	Besprechung	11.09.13
5.6	W	Nutzung der vorhanden Feinaktorik	Genauigkeit:5,0 nm	Besprechung	12.11.13
6 Automatisierung - Sensorik					
6.1	W	Nutzung der Kraftsensorik	Modifizierter Gripper von Femtotools	Aufgabenstellung	11.09.13
6.2	W	Nutzung der Positionssensorik	Konfokaler Sensor	Aufgabenstellung	11.09.13
7 Automatisierung - Sonstiges					
7.1	F	Kalibierung der relativen Position	Ja	Aufgabenstellung	04.09.13
7.2	W	Implementierung in vorhandener Steuersoftware	Labview	Aufgabenstellung	04.09.13
7.3	W	Nutzen einer z-Aktorik	Nanoaktorik	Besprechung	20.11.2013
7.4	F	Minimal zu fertigende Strukturgröße	$30 - 50\,\mu$m	Besprechung	03.12.2013

A.1.1 Erläuterungen

Messung

- **Einflusses der Automatisierung auf den Messfehler:** Durch die Automatisierung kann es eventuell zu einer Verbesserung der Messergebnisse kommen. Ob dies tatsächlich stattfindet, muss dokumentiert und beurteilt werden.
- **Veränderung des Messfehlers:** Es ist wünschenswert, eine Verminderung des Messfehlers zu erreichen.

Recherche

- **Bearbeitung der Fehlerquellen:** Da bei bisherigen Messungen oftmals eine Hysterese in der Kraft-Weg-Kennlinie zu sehen ist, soll betrachtet werden, welche Effekte ursächlich für diese Fehler sein können.
- **Untersuchung der Auftretenden Kräfte:** Zwischen zwei Flächen können verschiedene Kräfte auftreten. Dazu ist zu untersuchen, welchen Einfluss Elektrostatische Kräfte, Adhäsionskräfte spielen und Welche Kräfte bei Schaltkontakten auftreten.
- **Einfluss der Verkippung der Strukturen:** Bei dem einleiten eine Kraft am Kopf der Pilze verhalten sich die Nanodrähte wie Federn. Dadurch kann es zu einer Verkippung der Strukturen kommen. Damit kann einher gehen, dass der Kraftvektor der Rückstellkraft gegenüber der Kraftmessrichtung versetzt ist.
- **Einfluss des Versatzes des Sensors:** Die Strukturen Besitzen einen Durchmesser, welcher im Mikrometer-Bereich ist. Deswegen ist es möglich, dass die Kraftmessspitze nicht mittig ansetzt, sondern am Rand dieser Struktur. Dabei kann es auch zu einer Torsion in der Struktur kommen. Hier ist anhand eines Modells zu Berechnen, welchen Einfluss dieser Versatz in der Rückstellkraft spielt.

Sensorik

- **Nutzung der Kraftsensorik:** Bei der Automatisierung muss zwar der Gripper von Femtotools nicht genutzt werden, aber er muss für die Messung weiterhin vorhanden sein. Mit Begründung ist die Sensorik erweiterbar.
- **Nutzung der Positionssensorik:** Es steht ein Konfokaler Abstandssensor zur Verfügung, welcher eine Auflösung von 36 nm hat.

Sonstiges

- **Kalibierung der relativen Position:** Für eine Automatisierung der Positionierung muss es für den Messtand möglich sein, die Aktuelle Position in Erfahrung zu bringen. Deswegen ist es notwendig, diese Ursprungsposition zu bestimmen.

- **Implementierung in vorhandener Steuersoftware:** Der Messstand ist in LabView implementiert. Eine Implementierung der Positionierung und Automatisierung in LabView wäre wünschenswert, ist jedoch nicht gefordert.

A.2 Funktionsstrukturen

A.2.1 Funktionsstruktur 1

Abbildung A.1.: Funktionsstruktur 1

Die Position wird ohne Kontakt gewonnen und die Positionierung erfolgt über eine Aktorik am Kraftsensor. Dabei wird erst der Weg nach der Wandlung in mechanische Energie auf die Aktorik aufgebracht.

A.2.2 Funktionsstruktur 2

Abbildung A.2.: Funktionsstruktur 2

Die Position wird ohne Kontakt gewonnen und die Positionierung erfolgt über eine Aktorik am Substrat. Dabei wird erst der Weg nach der Wandlung in mechanische Energie auf die Aktorik aufgebracht.

A.2.3 Funktionsstruktur 3

Abbildung A.3.: Funktionsstruktur 3

Die Position wird ohne Kontakt gewonnen. Vor der Lokalisierung wird der Kraftsensor bewegt. Die Positionierung erfolgt über eine Aktorik am Kraftsensor.

A.2.4 Funktionsstruktur 4

Abbildung A.4.: Funktionsstruktur 4

Die Position wird ohne Kontakt gewonnen. Vor der Lokalisierung wird der Kraftsensor und das Substrat bewegt. Die Positionierung erfolgt über eine Aktorik am Substrat.

A.2.5 Funktionsstruktur 5

Abbildung A.5.: Funktionsstruktur 5

Die Position wird über einen Kontakt gewonnen. Die Positionierung erfolgt über eine Aktorik am Kraftsensor. Dabei wird erst der Weg nach der Wandlung in mechanische Energie auf die Aktorik aufgebracht.

A.2.6 Funktionsstruktur 6

Abbildung A.6.: Funktionsstruktur 6

Die Position wird über einen Kontakt gewonnen. Vor der Lokalisierung wird der Kraftsensor und das Substrat bewegt. Die Positionierung erfolgt über eine Aktorik am Kraftsensor. Dabei wird erst der Weg nach der Wandlung in mechanische Energie auf die Aktorik aufgebracht.

Abbildung A.7.: Funktionsstruktur 7

A.2.7 Funktionsstruktur 7

Die Position wird über einen Kontakt gewonnen. Vor der Lokalisierung wird der Kraftsensor und das Substrat bewegt. Die Positionierung erfolgt über eine Aktorik am Kraftsensor.

A.2.8 Funktionsstruktur 8

Abbildung A.8.: Funktionsstruktur 8

Die Position wird ohne Kontakt gewonnen. Die Zielnachricht wird der mechanischen Energie aufgeprägt, dann mit Substrat verbunden.

A.2.9 Austauschbare Elemente zum Positionieren

Folgende Strukturen sind untereinander Ersetzbar:

Abbildung A.9.: Austauschbare Elemente zum Positionieren

A.2.10 Austauschbare Elemente zum Kontaktieren

Folgende Strukturen sind untereinander Ersetzbar:

Abbildung A.10.: Austauschbare Elemente zum Kontaktieren

A.3 Teilprobleme

A.3.1 A-Probleme

Feststellen der relativen Position zwischen Kraftsensor und Substrat

Abbildung A.11.: Feststellen der Position über Kontakt zwischen Kraftsensor und Substrat

Das Wichtigste Problem stellt die Erkennung der Position des Kraftsensors in Relation zu dem Substrat dar. Hier auftretende Fehler können im späteren Verlauf kaum ausgebessert werden und wirken sich somit auf die Positionierungs- und Wiederholgenauigkeit der Automatisierung aus. Sowohl die Struktur in Abbildung A.11, als auch in Abbildung A.12 gelten für dieses eine Teilproblem.

A.3.2 B-Probleme

Abbildung A.12.: Feststellen der Position ohne Kontakt zwischen Kraftsensor und Substrat

Abbildung A.13.: Berechnung des Weges aus Position und Zielposition

Berechnung des Weges

Bei der Berechnung des Weges zu den Stukturen ist es wichtig, dass es dabei nicht zu einem Kontakt mit anderen Strukturen kommt. Dies könnte zu einem Abbrechen der Kraftspitze oder einem Zerstören der Strukturen führen.

Mechanische Einkopplung des Weges

Abbildung A.14.: Mechanische Einkopplung des Weges

Hierbei wird der Weg erst nach der Wandlung der elektrischen Energie in mechanische eingekoppelt. Hierfür muss also eine spezifische Lösung des Problems erarbeitet werden und es kann nicht auf schon vorhandene Lösungen zurückgegriffen werden.

A.3.3 C-Probleme

Aktorik

Folgende Teilprobleme stellen die Aktorik dar

Abbildung A.15.: Bewegen des Substrats

Abbildung A.16.: Verarbeiten des Weges in Mechanische Energie

Abbildung A.17.: Aufbringen Mechanischer Energie auf Substrat

Abbildung A.19.: Bewegen des Kraftsensors

Aktorik ist durch den Messstand schon vorhanden. Deswegen ist hier keine Lösungsfindung an sich notwendig. Lediglich die Wahl der genutzten Achsen ist hier relevant. Zusätzlich könnte eine Aktorik entlang der z-Achse hinzugefügt werden.

Energieverwaltung

Abbildung A.18.: Aufbringen Mechanischer Energie auf Sensor

Abbildung A.20.: Trennen Elektrischer Energie

A.4 Morphologischer Kasten

A.4.1 A-Problem: Feststellen der relativen Position über Kontakt zwischen Kraftsensor und Substrat

Dieses Problem ist Aufteilbar in 2 Untergruppen:

- Die Form der Strukturen und die Positionsgewinnung
- Die Anordnung der Strukturen zueinander

Diese 2 Gruppen werden getrennt gelöst und bewertet. Dabei nimmt die Anordnung der Struktur den Stellenwert eines B-Problems ein.

A.4.2 Die Form der Strukturen und die Positionsgewinnung

Der Kontakt der Messspitze mit der Referenzstruktur muss zu einer Lokalisierung sowohl in x- als auch in y-Richtung führen. Die Messspitze kann allerdings nur Kräfte in x-Richtung messen. Deswegen werden hier spezielle Strukturen genutzt, welche auf eine y-Position Rückschließen können.

Lösungen

Struktur mit Einbuchtung

Hier (Abbildung A.21) wird die y-Position über die 2 Kanten in y-Richtung gemessen. Muss die Spitze weiter fahren als erwartet, so weiß das System, dass die Einbuchtung erreicht

wurde und somit der Sprung zwischen der aktuellen und der letzten Messung stattgefunden hat.

Abbildung A.21.: Struktur mit Einbuchtung

Struktur mit Einbuchtung und Einschluss

Hier (Abbildung A.22) ist das Messprinzip gleich wie bei Absatz A.4.2, jedoch ...

Abbildung A.22.: Struktur mit Einbuchtung und Einschluss

Struktur mit schrägen Kanten zur Positionsgewinnung über Geometrie

Hier (Abbildung A.23) wird erst eine Schräge vermessen und deren „Steigung“ bestimmt. Dann wird die gerade vermessen. Daraus kann dann ein Schnittpunkt gebildet werden und somit eine Lokalisation gewonnen werden.

Abbildung A.23.: Kante 3

Struktur mit schrägen Kanten und Einbuchtung

Diese Struktur mischt die Funktion von Absatz A.4.2 und Absatz A.4.2.

Abbildung A.24.: Struktur mit schrägen Kanten und Einbuchtung

Struktur mit Zickzack-Front

Abbildung A.25.: Struktur mit Zickzack-Front

Rechteckstruktur

Hier (Abbildung A.26) wird für die y-Lokalisierung die normale Kante eines Rechteckes herangenommen.

Abbildung A.26.: Rechteckstruktur

2 Rechteckstrukturen

Mischung aus Absatz A.4.2 und Absatz A.4.2

Abbildung A.27.: 2 Rechteckstrukturen

Kriterium y-Auflösung

Voraussetzungen für die Bewertung der y-Auflösung:

- Charakteristische Länge $c = 50\,\mu$m
- 4 Messungen für eine Struktur
- Y-Abstand zwischen Messungen 20 μm
- X-Auflösung gegen Wand: 1 μm

Begründung für die Werte der Voraussetzungen:

2 Messungen mit dem gewählten Y-Abstand erreichen 40 μm. Bei der Charakteristischen Länge von 50 μm ist deswegen automatisch spätestens die 3. Messung auf einer weiteren Kante. Die Anzahl der Messungen ist so klein, um eine Geometrische Betrachtung zu ermöglichen. Bei größeren Werten wäre eine Mittelwertbildung notwendig, welche sich in der rein Geometrischen Beobachtung schwer darstellt. Die gewählte X-Auflösung entspricht den gemessenen Werten.

Bestimmung erfolgt über Geometrische Berechnungen: Dabei werden über die Messungenauigkeiten aus Geometrischen Zusammenhängen errechnet.

Maßstab:

- $\leq 20\,\mu$m - Kleinstmöglichste Zahl gegeben durch Schrittgröße
- $\leq 15\,\mu$m
- $\leq 10\,\mu$m
- $\leq 5\,\mu$m

Dabei ist zu beachten, dass dies Aufgrund der tatsächlich kleiner Möglichen y-Schrittweite nicht dem Wert für die zu erwartende y-Auflösung entspricht, sondern einem Hilfswert für die Bewertung. Dieser Hilfswert wird genutzt, um die Geometrische Abschätzung möglich zu machen.

Kriterium Rotationsauflösung

Die Bewertung hat die gleichen Voraussetzungen wie die y-Auflösung. Auch hier wird über geometrische Berechnungen die maximale Ungenauigkeit gemessen. Hier werden die 2 voneinander Entferntesten Messpunkte genommen und durch Geraden mit den x-Ungenauigkeiten auf Ungenauigkeiten in der Rotationsauflösung zurückgeschlossen. Falls eine Struktur eine andere Berechnung mit sich bringt, wird diese miteingenommen.

Maßstab:

- $\leq 11°$
- $\leq 9°$
- $\leq 7°$
- $\leq 5°$

Kriterium Vermeidung von Strukturanteilen $< 50\,\mu$m

Kleine Strukturanteile sorgen für Fehler in der Strukturtreue. Deswegen sollten diese Vermieden werden

Maßstab:

- Kleine Strukturanteile vorhanden
- Kleine Strukturanteile nicht vorhanden

Bewertungsergebnisse

Nach der Bewertung kann die Struktur mit schrägen Kanten zur Positionsgewinnung über Geometrie am besten abschneiden. Dies ist vor allem durch die hohe y-Auflösung gegeben, welche diese Methode dank der geometrischen Positionserrechnung erreicht wird. Gegenüber der Struktur mit Einbuchtung und der Rechteckstruktur besitzt diese Methode zwar eine ungenauere Rotationsauflösung, jedoch ist dieser Unterschied nicht wesentlich genug, um die Bewertung umzuschwenken. Außerdem ist für die Buchtstruktur eine Charakteristische Länge von mindestens $100\,\mu$m notwendig, damit die Messspitze sich nicht einklemmt.

Für die Anordnungen bekam die Kraftmessung an 2 gegenüberliegenden Referenzstrukturen aufgrund der hohen Rotationsauflösung die beste Bewertung

Die Anordnung der Strukturen zueinander

Folgende Lösungen sind aufgelistet:

- 2 gegenüberliegende Referenzstrukturen
- einzelne Referenzstrukturen
- Nutzen der vorhandenen Messstrukturen

Kriterien

Kriterium Rotationsauflösung

Vorraussetzungen:

- Substratbreite von 5 cm
- y-Auflösung von $10\,\mu$m
- keine Strukturrotationsauflösung

Maßstab:

- keine Messung der Rotation
- $\geq 0{,}06°$
- $< 0{,}06°$

Kriterium Einfluss auf zu messende Strukturen

Werden zu messende Strukturen beeinflusst, so könnte dies durch eine Beanspruchung dieser zu einem Messfehler kommen. Deswegen sollte dies vermieden werden

Maßstab

- Einfluss vorhanden
- Kein Einfluss vorhanden.

A.4.3 A-Problem: Feststellen der Position ohne Kontakt zwischen Kraftsensor und Substrat

Hier muss sowohl die Position des Kraftsensors, als auch die Position des Substrates separat gemessen werden.

Feststellen der Position des Kraftsensors ohne Kontakt

Dieses Problem gestaltet sich als äußerst Kompliziert. Die Messspitze ist sehr klein und spiegelt.

2 Lösungsansätze:

- **Kamera mit Vergrößerungsoptik erkennt Messpitze mittels Bildverarbeitung:** Die Kamera kann nicht von oben verbaut werden, da die Auswerteplatine des Sensors das Bild bedeckt. Somit wären für eine 2-Achsen-Lokalisierung auch 2 Kameras notwendig. Außerdem müsste der Abstand der Fokusebene immer bekannt sein.
- **Konfokale Abstandsmessung zu Kraftsensor:** Auch hier ist für eine 2-Achsen-Lokalisierung der Einbau zweier Sensoren notwendig. Außerdem muss der Messpunkt des konfokalen Abstandssensor exakt auf die Messspitze gesetzt werden. Dies ist äußerst aufwendig

Ist somit als Lösung aufgrund erhöhter Aufwendigkeit nicht in Betracht zu ziehen.

A-Problem: Feststellen der Position des Substrates ohne Kontakt

Verschiedene Lösungen bieten sich für dieses Problem an:

- **Konfokale Abstandsmessung zu Referenzstruktur:** Der Sensor wird grob manuell in das Gebiet der Justagestruktur gebracht. Dann fährt dieser die Gegend suchend ab und prüft, ob eine Erhöhung des Substrates zu messen ist.
- **Laserprofilmessung:** Laserprofilmessung verbunden mit Bewegung des Substrates führt zu einem 3D-Modell und der Erkennung einer Referenzstruktur.
- **Optisches Abscannen nach spiegelender Referenzstruktur:** Ähnlich wie die konfokale Abstandsmessung. Jedoch wird hier keine Abstandsmessung getätigt, sondern auf eine Spiegelung eines Objektes des Substrates erwartet.

- **Abmessung horizontal mit Kapazität:** Grobe Positionierung um Referenzstruktur, dann Anfahren der Messelektrode nach unten und Abstandsmessung.
- **Metallkreuz wird durch Optik erkannt:** Kamera oben ist fest. Bilderkennung führt zur Lokalisierung.
- **Kapazitive Messung einer Referenz von oben:**

Kriterien

Verschiedene Kriterien

- **Genauigkeitsunterschiede bei verschiedenen Substratmaterialien:** Manche Materialien haben verschiedene Reaktionen auf die Messgenauigkeiten (Beispiel Farbe der Justagemarke für die optische Erkennung)
- **Maximale Positionsauflösung**
- **Notwendigkeit der Bewegung des Sensorsystems:** Für einige Messmethoden muss der Sensor bewegt werden. Das bringt Ungenauigkeiten und Aufwand mit sich.
- **Mustererkennung für Exakte Positionsauflösung nicht notwendig** Mustererkennung wie Bildverarbeitung und 3D-Modell-Erkennung ist aufwendig.
- **Objektfeldgröße** Zu einem Zeitpunkt kann entweder ein 2-Dimensionales Bild, eine 1-Dimensionale Linie oder nur ein Punkt gemessen werden. Dies hat Rückwirkungen auf die Geschwindigkeit.
- **Unterscheidung zwischen Referenzstruktur und Struktur eindeutig möglich**
- **Anschaffungskosten**

K.O.-Kriterium

- Genauigkeit $< 50\mu$m

A.4.4 Wahl der Aktorik

Hier sind die Kriterien:

- Verbesserung der Lokalisierungs- und Positionierungsgenauigkeit
- Notwendigkeit des Umbau des Messstandes

Hier gibt es auch nur 2 Lösungen

- nur x-Achse fein
- x- und y-Achse fein

Somit ist hier die Bewertung voll von der Gewichtung der Kriterien abhängig (Bei Gleichgewichtung bekommen beide Lösungen die gleiche Bewertung, da sie jeweils nur in einem der beiden Kriterien volle Punktzahl erreichen. In dem jeweils anderen Kriterium bekommen sie keine Punkte). Da schon durch die Strukturen eine Positionsauflösung weit unter der Toleranz erlangt wird, ist es wichtiger, den Messstand nicht umzubauen.

Somit wird nur die x-Achse fein bleiben.

A.4.5 Gesamtkonzept

Aus der durchgeführten Bewertung ergibt sich ein Gesamtkonzept mit der Struktur mit schrägen Kanten zur Positionsgewinnung über Geometrie. Außerdem wird diese Geometrie an 2 gegenüberliegenden Seiten des Substrates angebracht. Zudem wird kein weiterer Aktor verbaut. Eine Separate Bewertung mehrerer Gesamtkonzepte scheint nicht notwendig, da dies die Bewertungskriterien nicht besonders beeinflussen würde.

Morphologischer Kasten

A-Problem

Feststellen der relativen Position über Kontakt zwischen Kraftsensor und Substrat	Kraftmessung an 2 gegenüberliegenden Referenzsstrukturen	Kraftmessung an einzelner Referenzsstruktur (nur x-Achse fein)	Überlaufen mehrerer linear angeordneter Strukturen				
Bewertung	2,5	1	1,5				
Referenzstrukturen	Struktur mit schrägen Kanten zur Positionsgewinnung übe	Struktur mit Einbuchtung	2 Rechteckstrukturen	Struktur mit schrägen Kanten und Einbuchtung	Rechteckstruktur	Struktur mit Zickzack-Front	
	2,333333333	2,111111111	2,111111111	2	1	0	
Feststellen der Position ohne Kontakt zwischen Kraftsensor und Substrat							
Feststellen der Position des Kraftsensors	Optik erkennt Kraftsensor	Konfokale Abstandsmessung zu Kraftsensor [Bild]					
Bewertung	2,75	1,75					
Feststellen der Position des Substrates	Abstandsmessung zu Referenzstruktur	Laserprofilmessung	Optisches Abscannen nach spiegelnder Referenzstruktur [Bild]	Abstandsmessung horizontal mit Kapazität	Metallkreuz wird durch Optik erkannt	Kapazitive Messung einer Referenz von oben [Bild]	Orientieren des Substrates durch Magnete [Bild]
	2,555555556	2,666666667	2,333333333	2,333333333	2,222222222	1	K.O. - Positionsauflösung
Berechnung des Weges	Wegfindungsalgorithmus über Karte						

C-Probleme

Trennen Elektrischer Energie	Spannungsteiler	Stromteiler
Aktorik Kraftsensor	SmarAct x-Achse	SmarAct x- und y-Achse
Bewertung		
Aktorik Substrat	x-y-Linearstage	

A.5 Monte-Carlo Simulation

Zu der Unterstützung der Bewertung wurde eine Simulationsumgebung der Messungen der Strukturen in Java geschrieben. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Struktur mit Einbuchtung und der Struktur mit schrägen Kanten zur Positionsgewinnung über Geometrie.

A.5.1 Algorithmen

Innerhalb der Simulationsumgebung sind auch schon die entsprechenden Algorithmen implementiert. Beide Simulationen werden mit einer Charakteristischen Länge der Strukturen von 100 μm durchgeführt.

Struktur mit Einbuchtung

Hier wird der Markov-Algorithmus implementiert. Dieser kann über Wahrscheinlichkeiten einen Aufschluss über die Position der Messspitze geben. Dabei wird unterschieden, ob es schon einen Sprung in die Einbuchtung gab oder nicht. Diese Information bietet dann Rückschlüsse für die Position. Ist die Messpitze beispielsweise noch nicht gesprungen, so kann die Messspitze nicht in der Bucht selbst sein. Dies kann in die Wahrscheinlichkeitsverteilung mit aufgenommen werden und somit kann die Position gewonnen werden. In Abbildung A.28 sind die Wahrscheinlichkeitsverteilungen an einigen Stellen zu sehen. Interessant ist dabei der Sprung von y=100 auf y=115. Hier ist zu sehen, dass zwischen diesen Punkten der Sprung in die Einbuchtung stattgefunden hat und somit die Wahrscheinlichkeitsfunktion sich wesentlich verändert hat. Der zwete Sprung findet zwischen y=190 und y=205 statt.

Ergebnisse

Diese Struktur bietet nutzbare Ergebnisse. Durch eine Monte-Carlo-Simulation ergibt sich bei einer x- und y-Unsicherheit von 0,5 μm eine y-Auflösung von 2,6 μm. Dabei ist die Y-Schrittweite auf 5 μm eingestellt. Bei einer konstanten Y-Unsicherheit des Aktrs von 0,5 μm lässt sich die X-Unsicherheit der Kantenerkennung variieren: In Abbildung A.29 ist die entsprechende gewonnene y-Auflösung aufgetragen. Abbildung A.30 gibt an, mit welcher Sicherheit davon ausgegangen werden kann, dass die Messung korrekt ist.

Auswertung

Es ist zu sehen, dass die Methode bis zu einer X-Ungenauigkeit von 2,5 μm zuverlässige Ergebnisse bringt. Die Messungen bleiben solange zuverlässig, bis die Aktor-Ungenauigkeit der Y-Richtung 5 μm überschreitet. Solange diese Werte eingehalten werden kann mit einer Y-Genauigkeit von ca $2 - 3\,\mu$m gerechnet werden. Somit ist diese Methode unter den Rahmenbedingungen des Messstandes einsetzbar.

Struktur mit schrägen Kanten zur Positionsgewinnung über Geometrie

Der Algorithmus der Positionsgewinnung über schräge Kanten ist dagegen wesentlich unterschiedlich. Hier werden erst zahlreiche Messungen an den jeweiligen Kanten vorgenommen.

Abbildung A.28.: Wahrscheinlichkeitsverteilung an Exemplarischen Stellen

Abbildung A.29.: Y-Auflösung der Buchtenstruktur bei Variabler X-Unsicherheit

Abbildung A.30.: Messungssicherheit der Buchtenstruktur bei Variabler X-Unsicherheit

Dann werden für diese Kanten über einen Algorithmus Geraden gebildet. Der Schnittpunkt zwischen 2 Geraden der Kanten kann dann zur Gewinnung der Positionsinformation genutzt werden. Die Kanten werden intern in der Parameterform gespeichert. Ortsvektor und Richtungsvektor dieser Geraden werden über eine Mittelwertbildung gewonnen.

Ergebnisse

Die Monte Carlo-Simulation zu der Variation der X-Ungenauigkeit bei einer Y-Genauigkeit von $0{,}5\,\mu\text{m}$ ist in Abbildung A.31, Abbildung A.32 und Abbildung A.33 zu sehen. Bei einer x- und y-Unsicherheit von $0{,}5\,\mu\text{m}$ kann eine Y-Auflösung mit $1{,}0\,\mu\text{m}$ gewonnen werden. Bis zu einer Verdrehung von $27°$ kann eine Y-Auflösung von $< 5\,\mu\text{m}$ gehalten werden.

Auswertung

Die Graphen zeigen deutlich, dass diese Methode wesentlich robuster gegenüber der Buchten-Struktur ist. Selbst bei einer Abweichung der X- und Y-Genauigkeit von $10\,\mu\text{m}$ kann noch eine y-Auflösung von $< 20\,\mu\text{m}$ gewährleistet werden. Die Rotationsauflösung liegt in diesem Fall bei $\approx 10\,°$. Unter den Rahmenbedingungen des Messstandes kann eventuell sogar eine Y-Auflösung $< 1\,\mu\text{m}$ erlangt werden. Außerdem ist anzumerken, dass dieser Algorithmus derzeit nur die obere Ecke der Struktur zur Positionsgewinnung genutzt wird. Eine Variation der Y-Schrittgröße gibt zusätzlich noch Aufschluss, dass die besten Ergebnisse bei einer Y-Schrittgröße von $1 - 5\,\mu\text{m}$ die höchste Auflösung erlangt wird. Im Bereich $5 - 10\,\mu\text{m}$ wird die Y-Auflösung etwa doppelt ungenau. Die Variation der Charakteristischen Länge bringt ergibt, dass ab einer Kantenlänge $> 35\,\mu\text{m}$ eine zuverlässige Messung möglich ist.

Abbildung A.31.: Y-Auflösung der Winkelstruktur bei Variabler X-Unsicherheit

Abbildung A.32.: Messungssicherheit der Winkelstruktur bei Variabler X-Unsicherheit

Abbildung A.33.: Rotations-Auflösung der Winkelstruktur bei Variabler X-Unsicherheit

A.5.2 Lokalisierungsalgorithmen für die Simulation

CrossingLine.java

```
1 package com.dalthed.structuresim.bericht;
2
3 import java.awt.geom.Point2D;
11
12 /**
13  * CrossingLineAlgorithm
14  *
15  * Berechnet die Geraden analog zu den Kanten und gibt diese als VectorLines aus
16  *
17  * @author Daniel Thiem
18  *
19  */
20 public class CrossingLine extends Algorithm {
21
22     private static final double TOLERANCE = 15.0 / 360.0 * 2.0 * Math.PI;
23
24     /**
25      * Construktor - Struktur Objekt wird übergeben
26      *
27      * @param strAdpt
28      *            Struktur
29      */
30     public CrossingLine(Structure strAdpt) {
31         super(strAdpt);
32     }
33
34     /**
35      * Liste mit allen Messungen
36      */
37     private ArrayList<Point2D.Double> measurements = new ArrayList<Point2D.Double>();
38     /**
39      * Liste mit allen gefundenen Linien
40      */
41     public ArrayList<VectorLine> regLines;
42
43     /**
44      * Messung an den Algorithmus übergeben
45      *
46      * @param measurement
47      *            Messung im Point2D.Double Format
48      */
49     @Override
50     public void addMeasurement(Point2D.Double measurement) {
51         measurements.add(measurement);
52     }
53
54     /**
55      * Moving-Average Implementation. Hierfür werden die Messungen in der
56      * measurements ArrayList genutzt
57      *
58      * @param length
59      *            Länge des MA-Filters
60      * @return Gefilterte Messungen
61      */
62     private ArrayList<Double> movingAverage(int length) {
63         // Zwischenspeicher für Moving Average
64         ArrayList<Point2D.Double> linePoints = new ArrayList<Point2D.Double>();
65         // Rückgabe-Zwischenspeicher
66         ArrayList<Point2D.Double> output = new ArrayList<Point2D.Double>();
67
68         // Alle werte durchgehen
```

CrossingLine.java

```
69          for (int ct = 0; ct < measurements.size() - length; ct++) {
70              // Werte aufsummieren, bis length erreicht ist
71              double sumx = 0, sumy = 0;
72              for (int i = 0; i < length; i++) {
73                  sumx += measurements.get(ct + i).x;
74                  sumy += measurements.get(ct + i).y;
75                  linePoints.add(measurements.get(ct + i));
76              }
77              // Mittelwerte errechnen
78              double meanx = sumx / ((double) length);
79              double meany = sumy / ((double) length);
80              // In Rückgabeformat wandeln
81              Point2D.Double newPoint = new Point2D.Double(meanx, meany);
82              // In Zwischenspeicher speichern
83              output.add(newPoint);
84          }
85          return output;
86      }
87
88      /**
89       * Ausführung des Algorithmus, nachdem Messungen zuvor mit addMeasurement
90       * hinzugefügt werden. Danach kann reglines ausgelesen werden und somit die
91       * Geraden gewonnen werden
92       */
93      @Override
94      public ProbabilityDensity getResult() {
95          // Zwischenspeicher für die Winkelberechnung
96          Point2D.Double lastPoint = null;
97          // Zwischenspeicher für die Erstellung der Geraden
98          ArrayList<Point2D.Double> linePoints = new ArrayList<Point2D.Double>();
99          // Speicher für die Geraden
100         regLines = new ArrayList<VectorLine>();
101         /*
102          * Speicher, in welcher Phase der Algorithmus sich gerade befindet:
103          * phase=0 => Schräge phase=1 => Vertikale
104          */
105         int phase = 0;
106         // Berechnung der größe des Moving-Average-Filters
107         int maSize = (measurements.size() > 90) ? measurements.size() / 30 : 3;
108         // MA-Filter durchführen
109         ArrayList<Double> newMeasurements = movingAverage(maSize);
110         // Maximale und Minimale Winkel finden und in maxDeg und minDeg
111         // speichern
112
113         double maxDeg = java.lang.Double.MIN_VALUE, minDeg = java.lang.Double.MAX_VALUE;
114         for (Double point : newMeasurements) {
115             if (lastPoint != null) {
116                 double angle = calcAngleBetween(lastPoint, point);
117                 if (angle > maxDeg) {
118                     maxDeg = angle;
119                 }
120                 if (angle < minDeg) {
121                     minDeg = angle;
122                 }
123
124             }
125             lastPoint = point;
126         }
127         // Zwischenspeicher für die Winkelberechnung zurücksetzen
128         lastPoint = null;
129         // Eigentlicher algorithmus
```

CrossingLine.java

```
130         for (Double point : newMeasurements) {
131             // Erst anfangen, wenn 2 Punkte bekannt, damit Winkel zwischen
132             // beiden berechnet werden kann
133             if (lastPoint != null) {
134                 // Winkel berechnen
135                 double angle = (calcAngleBetween(lastPoint, point));
136                 if (phase == 0) {
137                     // In der Schrägen
138                     boolean condition;
139                     condition = (angle >= minDeg && angle <= minDeg / 2.0)
140                             || (angle <= maxDeg && angle >= maxDeg / 2.0);
141 
142                     if (condition) {
143                         // Winkel liegt innerhalb der gewählten Begrenzungen und
144                         // wird deswegen zu dem Zwischenspeicher hinzugefügt
145                         linePoints.add(lastPoint);
146                     } else {
147                         // Winkel nicht mehr in den Begrenzungen, falls mehr als
148                         // 1 Punkt im Zwischenspeicher ist, wird eine Gerade
149                         // gebildet und der Zwischenspeicher zurückgesetzt
150                         if (linePoints.size() > 1) {
151                             regLines.add(new VectorLine(linePoints));
152                             linePoints.clear();
153                         }
154                         // Es wird davon ausgegangen, dass die Vertikale jetzt
155                         // erreicht ist.
156                         phase = 1;
157                     }
158                 } else if (phase == 1) {
159                     // In der vertikalen
160                     boolean condition = (Math
161                             .abs(angle - (minDeg + maxDeg) / 2) < TOLERANCE);
162 
163                     if (condition) {
164                         // Winkel liegt innerhalb der gewählten Begrenzungen und
165                         // wird deswegen zu dem Zwischenspeicher hinzugefügt
166                         linePoints.add(lastPoint);
167                     } else {
168                         // Winkel nicht mehr in den Begrenzungen, falls mehr als
169                         // 1 Punkt im Zwischenspeicher ist, wird eine Gerade
170                         // gebildet und der Zwischenspeicher zurückgesetzt
171                         if (linePoints.size() > 1) {
172                             regLines.add(new VectorLine(linePoints));
173                             linePoints.clear();
174                         }
175                         // Es wird wieder von einer Schrägen Kante ausgegangen
176                         phase = 0;
177                     }
178                 }
179             }
180             // Letzten Punkt zwischenspeichern (Winkelberechnung)
181             lastPoint = point;
182         }
183         // Wenn noch Daten im Zwischenspeicher sind, werden diese zu einer
184         // Gerade gewandelt
185         if (linePoints.size() > 1) {
186             regLines.add(new VectorLine(linePoints));
187         }
188         // Wurden zu viele Geraden gefunden, so können Geraden mit ähnlichen
189         // Winkeln zusammengefasst werden
190         if (regLines.size() > 2) {
```

CrossingLine.java

```
191             // Zwischenspeicher für Gerade an schräger und vertikaler Kante
192             VectorLine startAngleLine = null;
193             VectorLine vertLine = null;
194             for (VectorLine line : regLines) {
195                 double angle = line.getMeanAngle();
196                 // Liegen die Winkel der Geraden in gewählten Begrenzungen, so
197                 // werden diese zusammengefasst
198                 if (angle >= minDeg && angle <= minDeg / 3.0) {
199                     // Top
200                     if (startAngleLine != null) {
201                         startAngleLine.merge(line);
202                     } else {
203                         startAngleLine = line;
204                     }
205                 } else if (angle > minDeg / 4.0 && angle < maxDeg / 4.0) {
206                     // Mid
207                     if (vertLine != null) {
208                         vertLine.merge(line);
209                     } else {
210                         vertLine = line;
211                     }
212                 }
213             }
214             // Wurden für jede Kante eine Gerade gefunden, so werden diese
215             // abgespeichert
216             if (startAngleLine != null && vertLine != null) {
217                 regLines.clear();
218                 regLines.add(startAngleLine);
219                 regLines.add(vertLine);
220             } else {
221 
222             }
223         }
224         return null;
225     }
226 
227     public double calcAngleBetween(Point2D.Double p1, Point2D.Double p2) {
228         return Math.atan((p1.x - p2.x) / (p1.y - p2.y));
229     }
230 
231     public double toRad(double deg) {
232         return deg / 360.0 * 2.0 * Math.PI;
233     }
234 }
235 
```

JumpDetectionAlgorithm.java

```
1 package com.dalthed.structuresim.bericht;
2
3 import java.awt.geom.Point2D;
13
14 /**
15  * JumpDetectionAlgorithm
16  *
17  * Erkennt Sprünge in der Buchtenstruktur und kann somit die Messpitze
18  * lokalisieren
19  *
20  * @author Daniel Thiem
21  *
22  */
23 public class JumpDetectionAlgorithm extends Algorithm {
24
25     /**
26      * Toleranz in x-Richtung zwischen 2 Messwerten, bis eine Kante erkannt wird
27      */
28     private static final int TOLERANCE = 5;
29     /**
30      * Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion in Y-Richtung
31      */
32     private ProbabilityDensity probabilityY;
33
34     /**
35      * Constructor - Struktur Objekt wird übergeben
36      *
37      * @param strAdpt
38      */
39     public JumpDetectionAlgorithm(Structure strAdpt) {
40         super(strAdpt);
41         // Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion mit korrekter Länge initialisieren
42         this.probabilityY = new ProbabilityDensity(strAdpt.getMaxY());
43     }
44
45     /**
46      * Liste mit allen Messungen
47      */
48     private ArrayList<Point2D.Double> measurements = new ArrayList<Point2D.Double>();
49
50     /**
51      * Messung an den Algorithmus übergeben
52      *
53      * @param measurement
54      *            Messung im Point2D.Double Format
55      */
56     @Override
57     public void addMeasurement(Point2D.Double measurement) {
58         measurements.add(measurement);
59     }
60
61     /**
62      * Algorithmus zur Berechnung der Position. Die Gefundene Position kann aus
63      * der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion abgelesen werden
64      */
65     @Override
66     public ProbabilityDensity getResult() {
67
68         if (this.structure instanceof BayStructure) {
69             BayStructure bStruct = (BayStructure) this.structure;
70             // Zwischenspeicher der letzten Messungen
```

JumpDetectionAlgorithm.java

```
71            double lastX = -1;
72            double lastY = -1;
73            // Statusvariable, ob sich die letzte Messung in der Bucht befunden
74            // hat
75            boolean inBay = false;
76            int maxMeasurements = measurements.size();
77            int ct = 0;
78            // Alle Messungen durchgehen
79            for (Point2D.Double nextPoint : measurements) {
80                ct++;
81                // Erst prüfen, wenn ein vorgegangener Messwert vorhanden war,
82                // um Sprung zu erkennen
83                if (lastX != -1) {
84                    // Sprünge mit Toleranz erkennen
85                    if (lastX - nextPoint.x > TOLERANCE) {
86                        // JumpBackwards
87                        inBay = false;
88                    } else if (Math.abs(lastX - nextPoint.x) > TOLERANCE) {
89                        // JumpForward
90                        inBay = true;
91                    }
92                    /**
93                     * Dieser Algorithmus ist an eine Markov-Lokalisation
94                     * angelehnt: Mit jeder Messung wird eine Wahrscheinlichkeit
95                     * angegeben, wo sich der Sensor gerade befindet. Dies kann
96                     * darüber angegeben werden, ob sich die Messspitze gerade
97                     * in der Bucht befindet, oder nicht. Ist sie in der Bucht,
98                     * so besitzt die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für
99                     * diese Messung an den Stellen der Bucht hohe
100                    * Wahrscheinlichkeiten an. Als nächster schritt werden die
101                    * neue und die alte Wahrscheinlichkeitsdichte
102                    * zusammengefasst. Somit kann mit mehr Messungen die
103                    * Wahscheinlichkeit immer fokusierter auf einzelne Punkte
104                    * beschrieben werden.
105                    */
106                   if (!inBay) {
107                       ArrayList<Limits> limits = new ArrayList<Limits>();
108                       limits.add(new Limits(0, (int) bStruct.bayBeginning()));
109                       limits.add(new Limits((int) bStruct.bayEnd(),
110                               (int) bStruct.getMaxY()));
111                       ProbabilityDensity newProb = new ProbabilityDensity(
112                               probabilityY.getMax(), limits, 0.95);
113                       probabilityY.merge(newProb);
114
115                   } else {
116                       ArrayList<Limits> limits = new ArrayList<Limits>();
117                       limits.add(new Limits((int) bStruct.bayBeginning(),
118                               (int) bStruct.bayEnd()));
119                       ProbabilityDensity newProb = new ProbabilityDensity(
120                               probabilityY.getMax(), limits, 0.95);
121                       probabilityY.merge(newProb);
122                   }
123
124                   if (ct < maxMeasurements) {
125                       //Verschieben der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
126                       probabilityY.move((int) (nextPoint.y - lastY));
127
128                   }
129
130               }
131               //Zwischenspeicher befüllen
```

JumpDetectionAlgorithm.java

```
132                 lastX = nextPoint.x;
133                 lastY = nextPoint.y;
134             }
135             //Wahscheinlichkeitsdichtefunktion zurückgeben
136             return probabilityY;
137 
138         }
139         return new ProbabilityDensity(probabilityY.getMax());
140     }
141 
142 }
143 
```

A.6 LabView Implementierung

Bedienoberfläche: Die Bedienung der Automatisierung wurde in die vorhandene LabView-Oberfläche eingefügt. Dabei ist es auch dem Nutzer möglich, die gewünschte Zielposition einzugeben und diese anzufahren lassen. Vor der Bewegung wird der Nutzer gewarnt, zu schauen, ob die Messspitze hoch genug ist, sodass es nicht zu einer Kollision zwischen Messspitze und Strukturen kommt. In einem weiteren Reiter der Software lassen sich feinere Einstellungen ändern und der aktuelle Fortschritt der Lokalisierung betrachten.

Abbildung A.34.: Hauptein- und Ausgabe auf der LabView-Oberfläche für die Automatisierung

Abbildung A.35.: Feineinstellungen und Debug-Ausgabe der LabView-Oberfläche für die Automatisierung

A.7 Fehlerabschätzung verschiedener Strukturen

A.7.1 Struktur mit schräger Kante

Eckpunkt wird als Nullpunkt angenommen. Geraden werden gezeichnet (Zu sehen im Bericht). Erste Gerade g_1 wird über die folgenden 2 Punkte definiert:

$$P_{g_1,1}(-y_0 - u_x, -y_0) \tag{A.1}$$
$$P_{g_1,2}(-y_0 + d_y + u_x, -y_0 + d_y) \tag{A.2}$$

Dies führt zu der Geraden:

$$g_1 : y = \frac{d_y}{d_y + 2u_x}(x + y_0 + u_x) - y_0 \tag{A.3}$$

2. Gerade:

$$P_{g_2,1}(-y_0 + u_x, -y_0) \tag{A.4}$$
$$P_{g_2,2}(-y_0 + d_y - u_x, -y_0 + d_y) \tag{A.5}$$

Die folgende Gerade:

$$g_2 : y = \frac{d_y}{d_y - 2u_x}(x + y_0 - u_x) - y_0 \tag{A.6}$$

3. Gerade:

$$P_{g3,1}(-u_x, -y_0 + 3d_y) \tag{A.7}$$
$$P_{g3,2}(u_x, -y_0 + 2d_y) \tag{A.8}$$

Die folgende Gerade:

$$g_3 : y = \frac{-d_y}{2u_x}(x + u_x) - y + 3d_y \tag{A.9}$$

4. Gerade:

$$P_{g3,1}(u_x, -y_0 + 3d_y) \tag{A.10}$$
$$P_{g3,2}(-u_x, -y_0 + 2d_y) \tag{A.11}$$

Die folgende Gerade:

$$g_3 : y = \frac{d_y}{2u_x}(x - u_x) - y + 3d_y \tag{A.12}$$

X-Wert Schnittpunkt Gerade 2 und Gerade 3:

$$x_{SP(g2,g3)} = \frac{u_x(5d_y - 2(4u_x + y_0))}{d_y} \tag{A.13}$$

X-Wert Schnittpunkt Gerade 1 und Gerade 4:

$$x_{SP(g1,g4)} = -\frac{u_x(5d_y + 8u_x - 2y_0)}{d_y} \tag{A.14}$$

Der Abstand der beiden Schnittpunkten ergibt die y-Auflösung A_y

$$A_y = 8u_x \tag{A.15}$$

Die Winkelversatzauflösung wird wie in der Grafischen Lösung aus 2 Winkeln zusammengesetzt.

$$A_{rot} \approx \arctan\left(\frac{x_{SP(g1,g4)} - u_x}{3d_y - y_0}\right) + \arctan\left(\frac{x_{SP(g2,g3)} - u_x}{3d_y - y_0}\right) \tag{A.16}$$

Das Abziehen von u_x im jeweiligen Nenner ist dabei dadurch begründet, da nicht der x-Abstand zwischen Ecke und Ursprung genutzt wird, sondern von der jeweils äußeren Fehlergrenze gerechnet wird. Der Nenner stellt den y-Abstand zu den Punkten dar.

A.7.2 Struktur mit Einbuchtung

Winkelversatzauflösung:

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{u_x}{d_y} \tag{A.17}$$

Abbildung A.36.: Darstellung des Winkelfehlers

A.7.3 Berechnung des Positionierungsfehler durch Winkelfehler

α bezeichnet hier den Winkelversatzfehler der Lokalisierung. d ist die Gefahrene Strecke. d_f ist die Distanz zwischen angefahrenen Punkt und gewünschten Punkt.

$$\sin(\alpha) = \frac{\Delta y}{d} \tag{A.18}$$

$$\cos(\alpha) = \frac{\Delta x}{d} \tag{A.19}$$

$$x_f = d - \Delta x \tag{A.20}$$

$$d_f^2 = x_f^2 + \Delta x^2 \tag{A.21}$$

Dies ergibt:

$$x_f = d(1 - \cos(\alpha)) \tag{A.22}$$

$$d_f = \sqrt{d^2(1 - cos(\alpha)) + d^2 \sin^2(\alpha)} \tag{A.23}$$

$$d_f = d\sqrt{2 - 2\cos(\alpha)} \tag{A.24}$$

A.7.4 Berechnung der Winkelauflösung bei 2 Strukturen

Die Lokalisierung der Strukturen mit dem Abstand d_s ergeben jeweils einen Punkt, welcher maximal in x-Richtung um $\pm u_x$ und in y-Richtung maximal um $\pm A_y$ von dem echten Punkt abweicht. Der größte Winkel wird dann erreicht, wenn bei dem oberen Punkt die Messung komplett um u_x nach rechts und um A_y nach unten verschoben ist, während bei der unteren Messung der Punkt um u_x nach links und um A_y nach oben verschoben ist. Diese Punkte bilden einen Winkel welcher durch

$$tan(\alpha) = \frac{2u_x}{d_s - 2A_y}$$

beschrieben wird. Somit gilt:

$$\alpha = \arctan \frac{2u_x}{d_s - 2A_y}$$